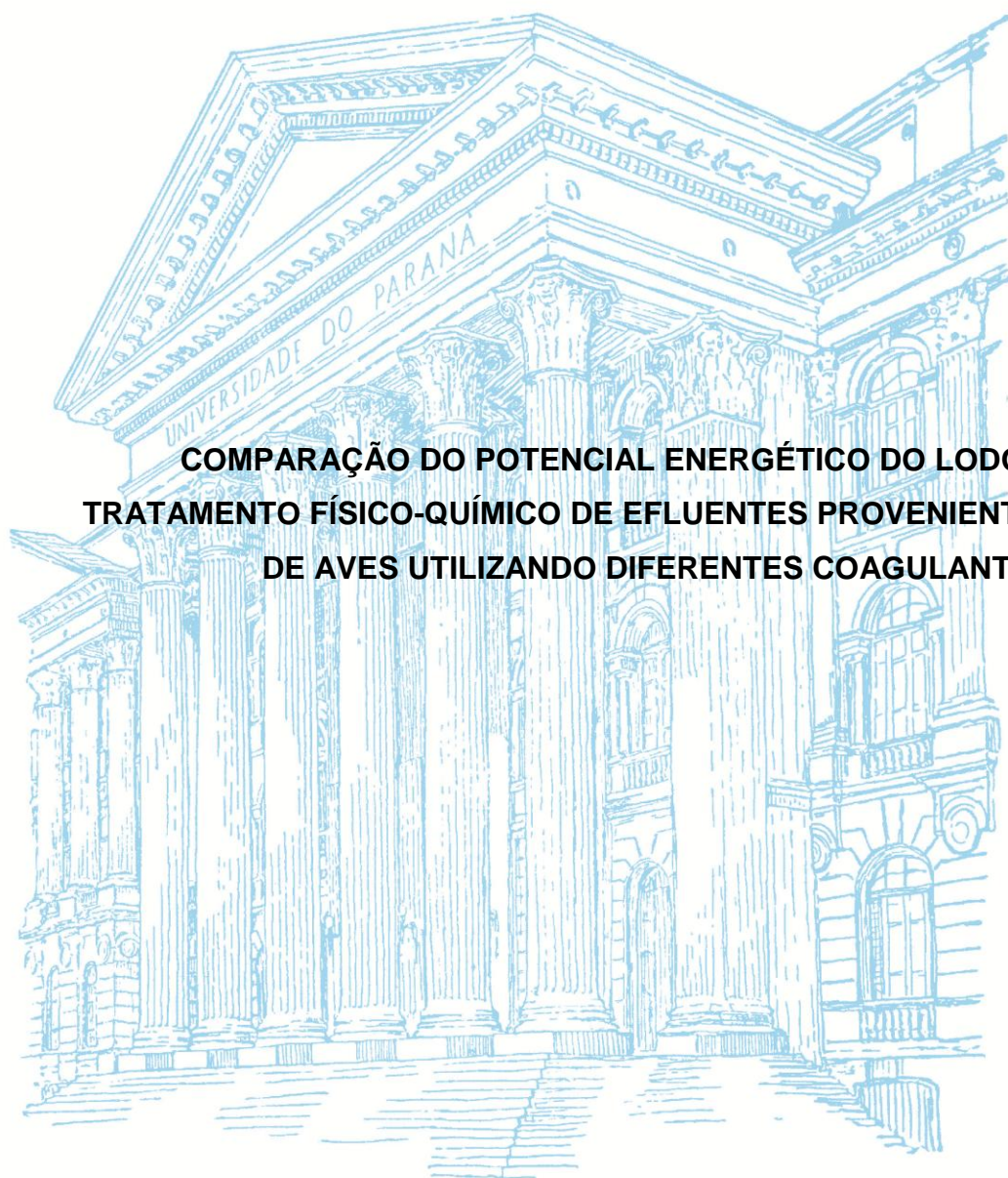


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KÁTIA CRISTINA FAGNANI



**COMPARAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO NO
TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE EFLUENTES PROVENIENTES DO ABATE
DE AVES UTILIZANDO DIFERENTES COAGULANTES**

PALOTINA

2017

KÁTIA CRISTINA FAGNANI

**COMPARAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO NO
TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE EFLUENTES PROVENIENTES DO ABATE
DE AVES UTILIZANDO DIFERENTES COAGULANTES**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, no Curso de Pós-Graduação em Tecnologia em Bioprodutos Agroindustriais, da Universidade Federal do Paraná, Setor de Palotina.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Leda M. Saragiotto Colpini

Coorientador: Prof. Dr. Helton José Alves

PALOTINA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F156 Fagnani, Kátia Cristina
Comparação do potencial energético do lodo gerado no
tratamento físico-químico de efluentes provenientes do abate de
aves utilizando diferentes coagulantes / Kátia Cristina Fagnani.
– Palotina, 2017.
140f.

Orientadora: Leda M. Saragiotto Colpini.

Coorientador: Helton José Alves.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná,
Setor Palotina, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia em
Bioprodutos Agroindustriais.

1. Tratamento de efluentes. 2. Lodo de flotador. 3. Abatedouro
de aves. I. Colpini, Leda M. Saragiotto. II. Alves, Helton José.
III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

CDU 628.3



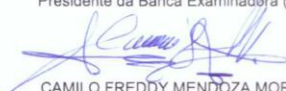
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor PALOTINA
Programa de Pós-Graduação TECNOLOGIAS DE BIOPRODUTOS AGROINDUSTRIAIS

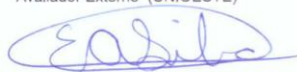
TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em TECNOLOGIAS DE BIOPRODUTOS AGROINDUSTRIAIS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **KATIA CRISTINA FAGNANI** intitulada: **COMPARAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA LODO GERADO NO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE EFLUENTES PROVENIENTES DO ABATE DE AVES UTILIZANDO DIFERENTES COAGULANTES**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO**.

PALOTINA, 15 de Março de 2017.


LEDA MARIA SARAGIOTTO COLPINI
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


CAMILO FREDDY MENDOZA MOREJON
Avaliador Externo (UNIOESTE)


EDSON ANTONIO DA SILVA
Avaliador Externo (UNIOESTE)

Dedico este trabalho a minha
família, que sempre me apoiou na busca
dos objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram não só pela realização deste trabalho como por toda jornada acadêmica cursada.

Agradeço imensamente a minha família, pelos compromissos cancelados, pelas luzes acessas nas madrugadas e principalmente pela compreensão e companheirismo.

A minha mãe, por ser exemplo de dedicação e esforço.

Aos professores pelas dicas, ideias, sugestões e orientação no decorrer do trabalho, assim como pela amizade edificada.

Aos abatedouros que participaram do estudo pela disponibilidade do material, especialmente ao abatedouro I pela oportunidade da realização dos testes in loco.

Aos colegas de trabalho pelo apoio e paciência nos momentos de stress e cansaço, e aos amigos pelo incentivo e motivação.

RESUMO

A região oeste do estado do Paraná destaca-se na produção e processamento de carne de frango, sendo que este processo na indústria frigorífica consome uma grande quantidade de água, e conseqüentemente, gera efluentes com elevada carga orgânica que necessitam de um tratamento específico. Normalmente o sistema de tratamento de efluentes empregado para esta atividade é o processo de flotação físico-química seguida de lagoas de estabilização, onde o lodo gerado no sistema de flotação necessita de um processamento, geralmente realizado através do aquecimento do lodo que posteriormente passa por decanters centrífugos para a separação em 3 fases, sendo: água residual, óleo flotado e lodo desidratado aproximadamente com 65% de umidade, este último resíduo é gerado em grande volume e ainda necessita de uma destinação adequada. Diante deste fato, visando buscar alternativas de aproveitamento para o lodo gerado no tratamento físico-químico de efluente proveniente da indústria de abate de aves como uma fonte de bioenergia, foi realizada a caracterização do lodo gerado com a utilização do coagulante cloreto férrico e também de um coagulante orgânico, posteriormente preparou-se amostras com % variável de 10, 20 e 30% de lodo adicionado ao cavaco, comparando o poder calorífico, análise imediata e análise térmica diferencial (ATD). Ambos os lodos em estudo foram classificados como Classe II A, ou seja, resíduo não inerte. Após, realizou-se um teste de combustão em caldeira utilizando como combustível 10% do lodo gerado com o cloreto férrico adicionado ao cavaco. Embora os resultados experimentais tenham mostrado que quanto maior a adição de lodo na amostra maior é o incremento do poder calorífico superior (PCS), definiu-se pelo teste in loco com a utilização máxima de 10 % de lodo misturado ao cavaco, para avaliação do comportamento térmico do equipamento, homogeneidade do combustível, devido à umidade do lodo apresentar uma média de 65%, e avaliação da emissão de gases poluentes comparados à combustão do cavaco puro. No teste de combustão realizado em escala industrial em um abatedouro de aves, evidenciou-se que com a adição do lodo no cavaco a pressão da caldeira apresentou melhor estabilidade, além da redução da velocidade da rosca de alimentação de combustível. As análises de gases e material particulado ficaram acima dos padrões de emissão. A combustão deste lodo em conjunto com o cavaco reduz custos com transporte e movimentação, evita riscos de possíveis passivos ambientais causados por terceiros devido ao transporte e destinação final, reduz o uso de combustível principal (cavaco) e estimula a utilização de biocombustíveis gerados a partir da biomassa residual. As cinzas geradas na combustão podem ser enviadas para compostagem ou podem ser utilizadas como adsorventes, conforme demonstrado nas análises de fissorção N_2 .

Palavras-chave: Tratamento de Efluentes. Lodo de Flotador. Abatedouro de aves.

ABSTRACT

The western region of the state of Paraná is known by the production and processing of chicken meat, and this process in the refrigeration industry consumes lots of water, thereafter, this generates effluent with high organic load that requires a specific treatment. Normally, the effluent treatment system used for this activity is the physico-chemical flotation process followed by stabilization tanks, where the sludge generated in the flotation system requires processing, usually performed by heating the sludge that later passes through centrifugal decanters for separation in 3 phases, being: residual water, floated oil and dehydrated sludge with approximately 65% of humidity, the latter residue is generated in large volume and it still needs an appropriate destination. Thus, aiming to find alternatives for the use of sludge generated in the physico-chemical treatment of effluent from the poultry slaughtering industry as a source of bioenergy, a characterization of the sludge was made with ferric chloride coagulant and also with an organic coagulant, posteriorly, samples with 10%, 20% and 30% of sludge added to the woodchip were prepared, comparing calorific power, immediate analysis and Differential Thermal Analysis (DTA). In these studies, both sludge were classified as Class II A, that is non-inert residue. After that, a combustion test was carried out in boiler using as fuel 10% of the sludge generated with the ferric chloride added to the woodchip. Though the experimental results showed that the greater the addition of sludge in the sample, the higher the Higher Heating Value (HHV), it was defined by the test in loco with a maximum of 10% of sludge mixed with the woodchip, for the evaluation of the thermal behavior of the equipment, homogeneity of the fuel, due to the humidity of the sludge present an average of 65%, and evaluation of the emission of pollutant gases compared to the combustion of the pure chip. In the industrial-scale combustion test carried out in a bird slaughterhouse, it was evidenced that with the addition of sludge in the woodchip, the boiler pressure presented better stability, besides the reduction of the speed of the thread of fuel supply. Analyzes of gases and particulate matter were above the emission standards. The combustion of this sludge with woodchip reduces transportation and handling costs, avoids risks of possible environmental liabilities caused by third parties due to transportation and final destination, reduces the use of primary fuel (woodchip) and stimulates the use of biofuels generated from the residual biomass. Ashes generated in the combustion can be sent to compost or can be used as adsorbents, as demonstrated in the BET analyzes.

Key-words: Wastewater treatment. Float sludge. Bird slaughterhouse.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONSUMO PER CAPTA DE CARNE DE AVES NO BRASIL.....	23
FIGURA 2 – ABATE DE FRANGO POR ESTADO BRASILEIRO	24
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DE UM ABATEDOURO DE AVES.....	25
FIGURA 4 – OPERAÇÕES AUXILIARES E DE UTILIDADES EM FRIGORÍFICOS.....	27
FIGURA 5 – PROCESSO DE TRATAMENTO PRIMÁRIO DE EFLUENTES	29
FIGURA 6 – PROCESSO DE FLOTAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	30
FIGURA 7 – SAÍDAS DO PROCESSO DE FLOTAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	30
FIGURA 8 – REAÇÃO DE FORMAÇÃO DO POLIDADMAC	33
FIGURA 9 – EQUIPAMENTO DECANter 3 FASES	34
FIGURA 10 – VISTA INTERNA DECANter 3 FASES	35
FIGURA 11 – PROCESSOS BÁSICOS DE CONVERSÃO DENDROENERGÉTICA DA BIOMASSA.....	37
FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE TEMPERATURA.....	49
FIGURA 13 – REAÇÕES DE COMBUSTÃO ACIMA DE 500 °C	53
FIGURA 14 – FLUXOGRAMA DOS LOCAIS GERADORES DE EFLUENTES LÍQUIDOS	63
FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS E PROCESSAMENTO DO LODO GERADO	64
FIGURA 16 – PROCESSO DE FLOTAÇÃO INSTALADO NO ABATEDOURO I.....	65
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO DO TRIDECANter E OS RESPECTIVOS PRODUTOS GERADOS	66
FIGURA 18 – AMOSTRA DE CAVACO COLETADO NO ABATEDOURO I	69
FIGURA 19 – TRITURADOR DE CAVACO E GRANULOMETRIAS DESEJADAS ..	69
FIGURA 20 – LODO APÓS SECAGEM EM ESTUFA	70
FIGURA 21 – LODO I ANTES E APÓS MOAGEM	70
FIGURA 22 – PESAGEM DO LODO SECO E MOÍDO	72
FIGURA 23 – PREPARO DE AMOSTRA DE CAVACO COM LODO	72
FIGURA 24 – AMOSTRA DO COMBUSTÍVEL COMPOSTO POR CAVACO + 10% DE LODO	78
FIGURA 25 – PONTOS DE COLETA DE GASES, MATERIAL PARTICULADO E VISTA EXTERNA DA CHAMINÉ DA CALDEIRA.....	79

FIGURA 26 – AMOSTRAS DE CINZAS APÓS COMBUSTÃO E PARTÍCULAS COLETADAS DO MULTICICLONE.....	80
FIGURA 27 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA AMOSTRAGEM DE MATERIAL PARTICULADO.....	81
FIGURA 28 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA AMOSTRAGEM DE GASES.....	82
FIGURA 29 – EQUIPAMENTOS MEV/EDS.....	83
FIGURA 30 – MICROGRAFIA DAS CINZAS PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DO CAVACO OBTIDAS EM MEV.....	110
FIGURA 31 – MICROGRAFIA DA PARTÍCULA LAMELAR E AGLOMERADA DAS CINZAS PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DO CAVACO OBTIDAS EM MEV/EDS	111
FIGURA 32 – MICROGRAFIA DAS CINZAS PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DO LODO ADICIONADO AO CAVACO OBTIDAS EM MEV	113
FIGURA 33 – MICROGRAFIA DAS PARTÍCULAS DAS CINZAS PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DE LODO ADICIONADO AO CAVACO OBTIDAS EM MEV-EDS	114
FIGURA 34 – MICROGRAFIA DAS PARTÍCULAS RETIDAS NO MULTICICLONE OBTIDAS EM MEV	115
FIGURA 35 – IMAGEM DAS PARTÍCULAS RETIDAS NO MULTICICLONE OBTIDAS EM MEV/EDS	116
FIGURA 36 – ISOTERMA DE FISSISSORÇÃO DE CINZAS DA COMBUSTÃO DO CAVACO	118
FIGURA 37 – ISOTERMA DE FISSISSORÇÃO DE CINZA DA COMBUSTÃO DO LODO ADICIONADO AO CAVACO	119
FIGURA 38 – ISOTERMA DE FISSISSORÇÃO DOS PARTICULADOS RETIDOS NO MULTICICLONE APÓS COMBUSTÃO DO LODO ADICIONADO AO CAVACO	120

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES IMEDIATAS DAS AMOSTRAS DE LODO IN NATURA.....	84
GRÁFICO 2 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE ELEMENTAR DAS AMOSTRAS DE LODO IN NATURA.....	85
GRÁFICO 3 – ANÁLISE DE ÓLEOS E GRAXAS NAS AMOSTRAS DE LODO IN NATURA.....	87
GRÁFICO 4 – ANÁLISE DE ENXOFRE NAS AMOSTRAS DE LODO IN NATURA ..	88
GRÁFICO 5 – TEOR DE UMIDADE DAS AMOSTRAS DE CAVACO COLETADO NO ABATEDOURO I	92
GRÁFICO 6 – ANÁLISE IMEDIATA DO CAVACO COLETADO NO ABATEDOURO I	92
GRÁFICO 7 – ANÁLISE PODER CALORÍFICO DAS AMOSTRAS DE CAVACO COLETADO NO ABATEDOURO I	93
GRÁFICO 8 – ANÁLISE DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DAS AMOSTRAS DE LODO INCORPORADAS AO CAVACO	95
GRÁFICO 9 – ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL NAS AMOSTRAS DE LODO I, LODO II E CAVACO.....	96
GRÁFICO 10 – ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL NAS AMOSTRAS DE LODO I ..	98
GRÁFICO 11 – ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL NAS AMOSTRAS DE LODO II	99
GRÁFICO 12 – ATD NAS AMOSTRAS DE LODO I E LODO II	100
GRÁFICO 13 – VELOCIDADE DA ROSCA DE ALIMENTAÇÃO (Hz)	102
GRÁFICO 14 – COMPARAÇÃO DA PRESSÃO DA CALDEIRA DURANTE OS TESTES DE QUEIMA UTILIZANDO CAVACO PURO E CAVACO+LODO	103
GRÁFICO 15 – ANÁLISE DOS GASES EMITIDOS NA COMBUSTÃO DO CAVACO	104
GRÁFICO 16 – ANÁLISE DE CO EMITIDO NA COMBUSTÃO DO CAVACO CORRIGIDOS PARA 11% DE O ₂	104
GRÁFICO 17 – ANÁLISE DO % DE O ₂ E CO ₂ EMITIDOS NA COMBUSTÃO DO LODO ADICIONADO AO CAVACO	106
GRÁFICO 18 – ANÁLISE DE NO E NO _x EMITIDOS NA COMBUSTÃO DO LODO ADICIONADO AO CAVACO	106

GRÁFICO 19 – ANÁLISE DE SO ₂ EMITIDOS NA COMBUSTÃO DO LODO ADICIONADO AO CAVACO	107
GRÁFICO 20 – ANÁLISE DE CO EMITIDO NA COMBUSTÃO DO CAVACO CORRIGIDOS PARA 11% DE O ₂	108

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – REAÇÕES BÁSICAS DE COMBUSTÃO.....	39
QUADRO 2 – COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR E PODER CALORÍFICO DE BIOMASSAS RESIDUAIS	45
QUADRO 3 – VARIAÇÃO DA ENTALPIA NA ATD.....	50
QUADRO 4 – PADRÕES PARA FONTES EXISTENTES DE COMBUSTÃO EXTERNA UTILIZANDO COMO COMBUSTÍVEL DERIVADOS DE MADEIRA	56
QUADRO 5 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA COMBUSTÃO DO CAVACO COM OS PADRÕES PARA FONTES EXISTENTES PARA COMBUSTÃO DE DERIVADOS DE MADEIRA.....	105
QUADRO 6 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA COMBUSTÃO DO LODO E CAVACO COM OS PADRÕES PARA FONTES EXISTENTES PARA COMBUSTÃO DE DERIVADOS DE MADEIRA	109
QUADRO 7 – NBR 10005:2004 – LIXIVIADO – PARÂMETROS INORGÂNICOS .	137
QUADRO 8 – NBR 10005:2004 – PARÂMETROS DE LIXIVIAÇÃO	137
QUADRO 9 – NBR 10005:2004 – LIXIVIADO – PARÂMETROS ORGÂNICOS.....	138
QUADRO 10 – NBR 10006:2004 – EXTRATO SOLUBILIZADO – PARÂMETROS INORGÂNICOS.....	139
QUADRO 11 – NBR 10006:2004 – EXTRATO SOLUBILIZADO – PARÂMETROS ORGÂNICOS	140

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS COAGULANTES E INTERVALOS DE pH ÓTIMOS.....	31
TABELA 2 – COMPARAÇÃO DE NORMAS REFERENTES A EMISSÕES ATMOSFÉRICAS E QUALIDADE DO AR.....	58
TABELA 3 – DADOS DOS LOCAIS DE COLETA DE LODO.....	62
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE BRUTO.....	62
TABELA 5 – PLANEJAMENTO DAS ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO	68
TABELA 6 – COMPOSIÇÃO MÁSSICA DAS AMOSTRAS DE LODO E CAVACO..	71
TABELA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE CARACTERIZAÇÃO DE LODOS GERADOS EM ABATEDOUROS DE AVES	86
TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSTOS QUÍMICOS PRESENTES NAS AMOSTRAS DE LODO COM A RESOLUÇÃO SEMA 042/2008	89
TABELA 9 – COMPARAÇÃO DA CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE LODO IN NATURA CONFORME NBR 10.004.....	90
TABELA 10 – CLASSIFICAÇÃO CONFORME NBR 10.004:2004.....	91
TABELA 11 – COMPARAÇÃO DA ANÁLISE IMEDIATA DE CAVACO.....	93
TABELA 12 – ANÁLISE IMEDIATA AMOSTRAS DE LODO ADICIONADAS AO CAVACO	94
TABELA 13 – CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS DA AMOSTRA DE CINZAS DE CAVACO POR MEV-EDS	112
TABELA 14 – CARACTERIZAÇÃO DOS PONTOS INDICADOS NAS PARTÍCULAS DAS CINZAS DE LODO ADICIONADO AO CAVACO POR MEV-EDS.....	114
TABELA 15 – CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS RETIDAS NO MULTICICLONE APÓS COMBUSTÃO DE LODO ADICIONADO AO CAVACO POR MEV/EDS	117
TABELA 16 – CARACTERIZAÇÃO TEXTURAIS DAS CINZAS E PARTÍCULAS RETIDAS NO MULTICICLONE.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABPA - Associação Brasileira de Proteína Animal

Al_2O_3 - Alumina

ASTM - American Society for Testing and Materials

ATD - Análise térmica diferencial

B.S. - Base seca

C - Carbono

CO - Monóxido de Carbono

CO_2 - Dióxido de Carbono

Cl_2 – Gás cloro

CNTP – Condições Normais de temperatura e Pressão

CZ(%) = teor de cinzas

CF(%) = teor de carbono fixo

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

FeCl_3 - Cloreto férrico

Fe_2O_3 - Óxido de ferro III

g/cm^3 - Grama por centímetro cúbico

H_2O – Água

HCl – Ácido Clorídrico

MW - Megawatt

H - Hidrogênio

H_2SO_3 . Ácido sulfuroso

H_2SO_4 - Ácido sulfúrico

HNO_3 - Ácido Nítrico

K – Potássio

kJ - Quilo joule

kg - Quilograma

kg f/cm^2 – Quilograma força por centímetro quadrado

kcal - Quilocalorias

MP – Material Particulado

MV(%) = teor de materiais voláteis

mg/l – Miligrama por litro

MEV- Microscopia eletrônica de varredura

MEV-EDS - Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia por dispersão de energia de raios X

M_s = massa seca da amostra, g

M_i = massa inicial da amostra, g

M_f = massa final da amostra, g

MV(%) = teor de materiais voláteis

M_r = massa do resíduo, g

NBR – Norma Brasileira

NO - Monóxido de Nitrogênio

N - Nitrogênio

NO_x - Óxidos de Nitrogênio

NO_2 - Dióxido de Nitrogênio

N_2O - Óxido Nitroso

O_2 - Oxigênio

OG – Óleos e Graxas

O_3 – Ozônio

PAH's - Hidrocarbonetos aromáticos polinucleares

PCS - Poder Calorífico Superior

PCI - Poder Calorífico Inferior

S – Enxofre

SEMA – Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Estado do Paraná

SO_x - Óxidos de Enxofre

SO_2 - Dióxido de Enxofre

SO_3 – Trióxido de Enxofre

T_r - Temperatura da referência

T_a - Temperatura da amostra

TMV – Teor de material volátil

TCF – Teor de carbono fixo

TCZ – Teor de cinzas

VOC's - Compostos orgânicos voláteis

VMP – Valor máximo permitido

°C - Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA.....	19
1.2	OBJETIVOS	20
1.2.1	Objetivo Geral.....	20
1.2.2	Objetivos Específicos	20
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1	AGROINDÚSTRIA E A ATIVIDADE AVÍCOLA.....	22
2.2	CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS PRODUTIVOS DE ABATEDOURO DE AVES.....	24
2.3	SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS EMPREGADOS EM ABATEDOURO DE AVES	28
2.3.1	Processo de Flotação Físico Química	29
2.3.2	Coagulantes utilizados no Processo de Flotação Físico Química	31
2.3.3	Floculação no Processo de Flotação Físico Química	33
2.3.4	Processamento do lodo gerado no sistema de Flotação Físico-química.....	34
2.4	USO DA BIOMASSA RESIDUAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	36
2.4.1	Biomassa residual e processos de conversão.....	36
2.4.2	Caldeira	38
2.4.3	Combustão da Biomassa.....	38
2.4.4	Aproveitamento térmico do lodo gerado no abatedouro de aves	42
2.5	COMPOSIÇÃO DE BIOMASSA COMBUSTÍVEIS	44
2.5.1	Poder Calorífico	45
2.5.2	Análise Elementar.....	46
2.5.3	Análise Imediata	47
2.5.4	Análise Térmica Diferencial	48
2.6	CLASSIFICAÇÃO RESÍDUO CONFORME ABNT NBR 10.004.....	51
2.7	EMISSÕES ATMOSFÉRICAS PROVENIENTES DA QUEIMA DA BIOMASSA RESIDUAL.....	52
2.8	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) COM ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA DE RAIOS X (EDS)	59
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	61

3.1	IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL DE COLETAS DE LODO E SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTE IMPLANTADO.....	61
3.1.1	Coleta das Amostras	67
3.2	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	67
3.2.1	Caracterização das amostras <i>In Natura</i>	67
3.2.2	Preparo das amostras de Cavaco	68
3.2.3	Preparo das amostras de Lodo	70
3.2.4	Análise de poder calorífico Superior	73
3.2.5	Método para determinação de Poder calorífico Inferior (PCI).....	73
3.2.6	Análise Térmica Diferencial	74
3.2.7	Análise Elementar.....	74
3.2.8	Análise Imediata	74
3.3	TESTE IN LOCO PARA ANÁLISE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS.....	77
3.3.1	Amostragem de Material Particulado.....	80
3.3.2	Amostragem dos gases de combustão.....	81
3.3.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS)	82
3.3.4	Análises de Fisissorção N ₂	83
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS IN NATURA	84
4.1.1	Análise Imediata e Elementar Lodo I e Lodo II in natura	84
4.1.2	Caracterização NBR 10.004	90
4.1.3	Caracterização do cavaco utilizado nas amostras.....	91
4.1.4	Análise imediata e de Poder calorífico das amostras de lodo adicionadas ao cavaco em diferentes %	94
4.1.5	Análise Térmica Diferencial (ATD).....	96
4.2	COMPARAÇÃO DA COMBUSTÃO DO CAVACO PURO COM O LODO ADICIONADO AO CAVACO	101
4.3	RESULTADOS DAS ANÁLISES DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS.....	103
4.4	RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS CINZAS EM MEV/EDS.....	110
4.4.1	Análises das cinzas provenientes da combustão do cavaco puro	110
4.4.2	Análises das cinzas provenientes da combustão de lodo adicionado ao cavaco.....	113

4.4.3	Análises das partículas retidas no mult ciclone provenientes da combustão de lodo adicionado ao cavaco	115
4.4.4	Comparação das análises de Fisissorção de N ₂	117
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	121
	REFERÊNCIAS.....	125
	APÊNDICE A – RESULTADOS ANÁLISES NBR 10.005:2004.....	137
	APÊNDICE B – RESULTADOS ANÁLISES NBR 10.006:2004.....	139

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população impulsiona também o crescimento das indústrias processadoras de alimentos. Porém em contrapartida, o cenário atual apresenta escassez de recursos, principalmente água e energia. Frente a esta realidade uma alternativa sustentável é o aproveitamento dos resíduos gerados para a obtenção de bioenergia.

De acordo com o Sindicato das Indústrias de Produtos Avícolas do Estado do Paraná (Sindiavipar), ao longo de 2016 foram abatidas 1,67 bilhão de aves no estado de Paraná, este volume representa 33,25% das aves abatidas em todo o Brasil.

A água é um dos principais insumos da indústria frigorífica em unidades de abate e processamento de carnes. Para um abatedouro de aves este consumo varia de 20 a 30 litros por ave abatida. Segundo Krieger (2007) a água é utilizada para lavagem de caminhões, escaldagem, lavagem das vísceras e carcaças, transporte de produtos e resíduos, limpeza e esterilização de facas, equipamentos e pisos, alimentação de caldeiras e resfriamento de compressores e condensadores.

Após sua utilização, a água contém insumos da indústria frigorífica e torna-se um efluente industrial e deve ser enviada para tratamento adequado. Em geral, o sistema de tratamento de efluentes de frigoríficos de aves é composto por tratamento primário e secundário. Sendo que compreende o tratamento primário o processo de peneiramento (estático ou rotativo), tanque de equalização e flotor físico/físico-químicos. O tratamento secundário é composto por lagoas de estabilização e/ou sistemas de lodos ativados. Cabe ressaltar que o processo de flotação físico-química gera o lodo flotado, ou borra, que necessita de um tratamento posterior, que normalmente utiliza-se o processo de cozimento e centrifugação, com a obtenção do óleo residual, lodo centrifugado e água residual.

Segundo Virmond (2007), tanto o lodo quanto a gordura (óleo) podem ser submetidos à combustão direta, constituindo fontes renováveis de energia disponíveis a custos relativamente baixos comparado aos combustíveis primários.

A alternativa de utilização destes resíduos na própria indústria como fonte de energia renovável, pode tornar a cadeia da agroindústria cada vez mais sustentável, bem como atende também o atual plano de logística reversa de resíduos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Atualmente a destinação final amplamente utilizada para o lodo com aproximadamente 65% de umidade é a compostagem deste material em conjunto com outros resíduos que apresentam fontes de carbono. Embora seja uma destinação correta perante a legislação vigente, esta alternativa possui como desvantagens a necessidade de transporte deste material (do local gerado até local de compostagem), sendo que este fato que gera um alto custo para a empresa geradora. Além disso, é necessário uma grande área para armazenagem e realização da compostagem, e um período longo que varia de 90 a 180 dias para a estabilização do composto orgânico. Além disso, infelizmente a procura deste material para ser utilizado como adubo orgânico ainda é pequena, ocasionando um grande volume estocado. Perante esta situação surge a necessidade de identificar outras alternativas de sua utilização.

Outra possível destinação é a utilização juntamente com os subprodutos gerados nos abatedouros, sendo cozidos e prensados onde se transformam em farinhas com alto nível de proteína. Porém, para que o lodo seja utilizado desta maneira, existem alguns impedimentos, sendo o primeiro o coagulante utilizado no sistema de tratamento de efluentes. Para esta utilização deve-se utilizar um coagulante mais nobre, para que as características químicas do lodo sejam minimamente alteradas. Desta forma este tratamento torna-se mais caro comparado aos coagulantes comuns, o que pode inviabilizar sua aplicação.

Outra alternativa seria a utilização do lodo desidratado apresentando cerca de 60% de umidade (após o processamento do lodo flotado) em combustão realizada em caldeiras, sendo utilizado em conjunto com o combustível principal para geração de vapor para a indústria. Como esta alternativa não é difundida em escala industrial identificou-se a oportunidade de um estudo sobre suas particularidades.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade de aproveitamento do lodo gerado no tratamento físico-químico de efluente proveniente da indústria de abate de aves na utilização de combustível em caldeira, comparando as características do lodo gerado com o uso de dois diferentes coagulantes na etapa de flotação, visando uma destinação final que possua viabilidade técnica em escala industrial e seja ambientalmente adequada.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterização físico-química da amostra do lodo desidratado (após o tridecanter) gerado no processo de flotação físico-química utilizando como coagulante o cloreto férrico e floculante o polímero aniônico.
- b) Caracterização físico-química da amostra do lodo desidratado (após o tridecanter), gerado no processo de flotação físico-química utilizando um coagulante orgânico, a base de poliDADMAC, e como floculante um polímero aniônico e outro catiônico.
- c) Avaliação do poder calorífico das amostras de lodo, misturado em diferentes % com cavaco picado.
- d) Determinação do comportamento térmico através da análise térmica diferencial (ATD) das amostras preparadas com cavaco picado adicionado diferentes % de lodo.
- e) Comparação dos resultados da análise imediata das amostras do Lodo I e do Lodo II.
- f) Realização do teste de combustão em caldeira adicionando um % de lodo ao combustível principal (cavaco).
- g) Avaliar a eficiência térmica da caldeira com adição do lodo no combustível principal (cavaco).
- h) Analisar os índices dos poluentes CO, O₂, NO_x, SO_x e MP, emitidos na queima de cavaco juntamente com o % de lodo gerado com o coagulante cloreto férrico.

i) Analisar as cinzas geradas na combustão em caldeira do cavaco puro e do lodo adicionado ao cavaco através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com Espectroscopia por Dispersão de Energia de raios X (EDS).

j) Analisar as características texturais das cinzas a partir do método de fisissorção N_2 .

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 AGROINDÚSTRIA E A ATIVIDADE AVÍCOLA

No Brasil, a produção de aves teve início em 1532, com a vinda das primeiras raças trazidas pelos colonizadores portugueses. Eram criadas soltas nos quintais ou arredores das casas, onde se alimentavam com resto de comida caseira, grãos e insetos. No ano de 1900, iniciou-se a criação das aves em sítios e fazendas, representando fonte de renda, e a partir de 1930 a produção de aves para venda de carne e ovos passou a ser vista como atividade lucrativa (LOPES, 2011).

Os autores Vólia e Triches (2013) apontam o final da década de 50 como um período de transição, em que os frangos ainda eram abatidos de maneira artesanal e vendidos em feiras livres, com vendas regionalizadas e que somente mais tarde a avicultura começou a ganhar escalas industriais, com o surgimento dos primeiros abatedouros.

Na década de 70 houve uma reorganização na produção de carnes no Brasil, levando a atividade para a região Sul do País, já que antes esta era centralizada na região Sudeste. Criou-se então um sistema integrado, entre empresas e agricultores possibilitando um rápido desenvolvimento da carne de frango nacional (JUNIOR et al. 2009).

Já a expansão das plantas industriais avícolas no Brasil é dependente de uma conjuntura que inclui política agrícola, acesso aos mercados consumidores, aptidão dos produtores, condições de transporte e, principalmente, disponibilidade de matérias-primas indispensáveis para a produção de frangos: o milho e a soja (BELUSSO, 2010).

No início da década de 1980 já existia cooperativas atuando na avicultura de corte paranaense. No geral, na década de 90 as cooperativas agropecuárias partiram para um processo de industrialização, principalmente aquelas que tinham como principal atividade a produção e comercialização de grãos, pois a expansão baseada nesses produtos alcançou seus limites por essa época, além disso, o mercado externo achava-se bastante receptivo em relação à demanda por proteínas animais o que estimulou de forma significativa investimentos na modernização e expansão da agroindústria paranaense (TOMBOLO e DALLA COSTA, 2011).

Realizando uma comparação a evolução da capacidade de crescimento dos frangos (conversão ração/carne) aumentou cerca de 65% com redução do tempo de engorda que já foi de 105 dias, em 1930, para cerca de 45 dias, atualmente o que representa ganhos em termos de faturamento industrial.

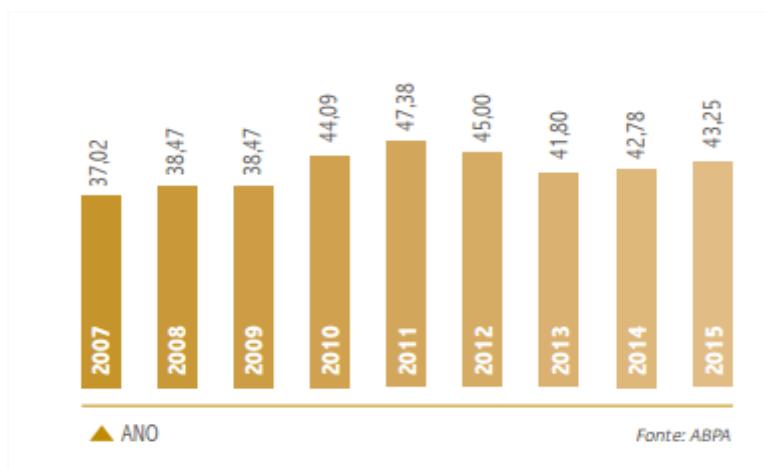
Segundo Belusso (2010), a partir da década de 1980, as principais cooperativas agrícolas instaladas na região passaram por uma reestruturação empresarial, especialmente, com a implantação de complexos industriais avícolas, tendo em vista alguns fatores favoráveis: disponibilidade de matérias-primas para a formulação de ração para as aves; aumento da demanda mundial e nacional por carne de frango; agregação de valor por meio da industrialização de carnes; possibilidades de diversificar as fontes de renda para os produtores de grãos.

O aumento da produção e da produtividade, reflexo da especialização da mão de obra e maquinário dos empreendimentos, resultou na concentração da agroindústria avícola em determinadas regiões, devido à disponibilidade de espaço, alimento e mão de obra, como é o caso do Oeste Paranaense, que contribui com grande porcentagem da produção brasileira de frangos (TESSARO, 2011).

Em 2015, mesmo com a crise econômica que acertou em cheio o Brasil, a produção de frango superou 13,1 milhões de toneladas, desta forma o país assumiu o segundo lugar no ranking de maiores produtores mundiais, que antes era da China, ficando atrás somente dos Estados Unidos (ABPA, 2016).

O consumo per capita de carne de aves no Brasil no ano de 2015 atingiu 43,25 quilos por habitante.

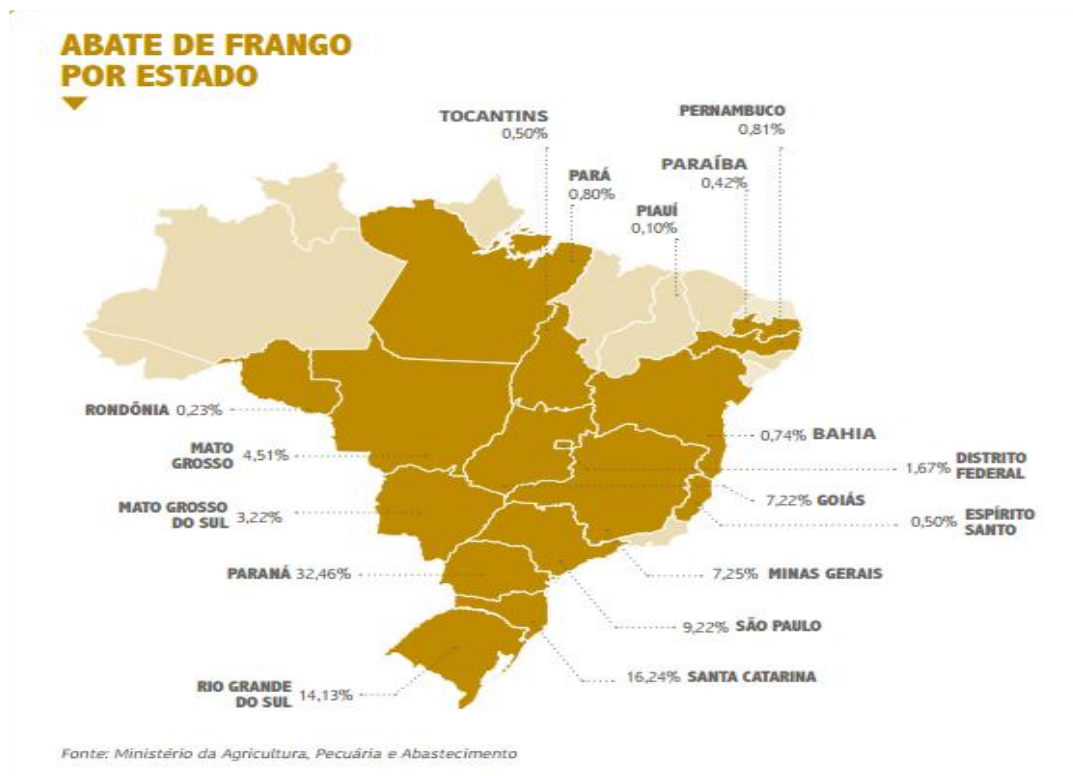
FIGURA 1 – CONSUMO PER CAPTA DE CARNE DE AVES NO BRASIL



FONTE: ABPA (2016).

Segue abaixo dados sobre o abate de frango em 2015 indicando o % de aves abatidas separadas por estados brasileiros.

FIGURA 2 – ABATE DE FRANGO POR ESTADO BRASILEIRO



FONTE: ABPA (2016).

Na Mesorregião Oeste Paranaense estão instaladas oito empresas abatedoras de frangos, dentre as quais cinco são cooperativas: C.Vale Cooperativa Agroindustrial (Palotina); Copacol Cooperativa Agroindustrial Consolata (Cafelândia); Copagril Cooperativa Agrícola Mista Rondon (Marechal Candido Rondon); Cooperativa Agroindustrial Lar (Medianeira); Coopavel Cooperativa Agroindustrial (Cascavel) e três empresas não cooperativas: Diplomata Industrial e Comercial (Cascavel); Kaefer Agroindustrial (Cascavel) e Sadia (Toledo). Para Lopes (2011), o aumento da atividade avícola no País resulta no aumento da geração de dejetos.

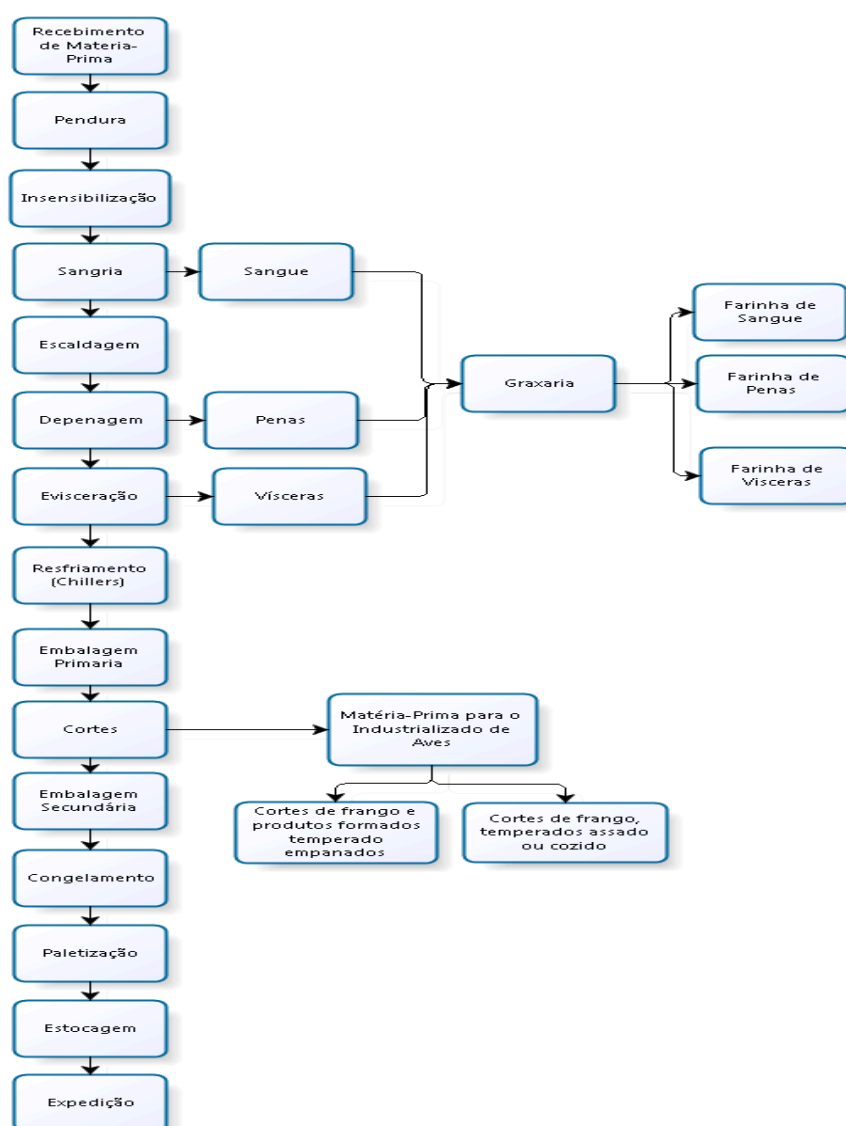
2.2 CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS PRODUTIVOS DE ABATEDOURO DE AVES

No Brasil o abate de aves deve ocorrer conforme o estabelecido no RIISPOA: Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitária dos Produtos de Origem Animal e no Regulamento Técnico da Inspeção Tecnológica e Higiênico-Sanitária de

Carne de Aves. Nesses regulamentos são tratadas questões que referem ao: pré-abate, que engloba a captura e transporte dos animais e o abate que consiste nas seguintes etapas: insensibilização, sangria, escaldagem, depenagem, evisceração, pré-resfriamento, resfriamento, gotejamento, classificação, embalagem, tempo de armazenamento (SILVA, 2007).

Na Figura 3 se apresenta um fluxograma para melhor entendimento do processo produtivo de um abatedouro de aves.

FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DE UM ABATEDOURO DE AVES



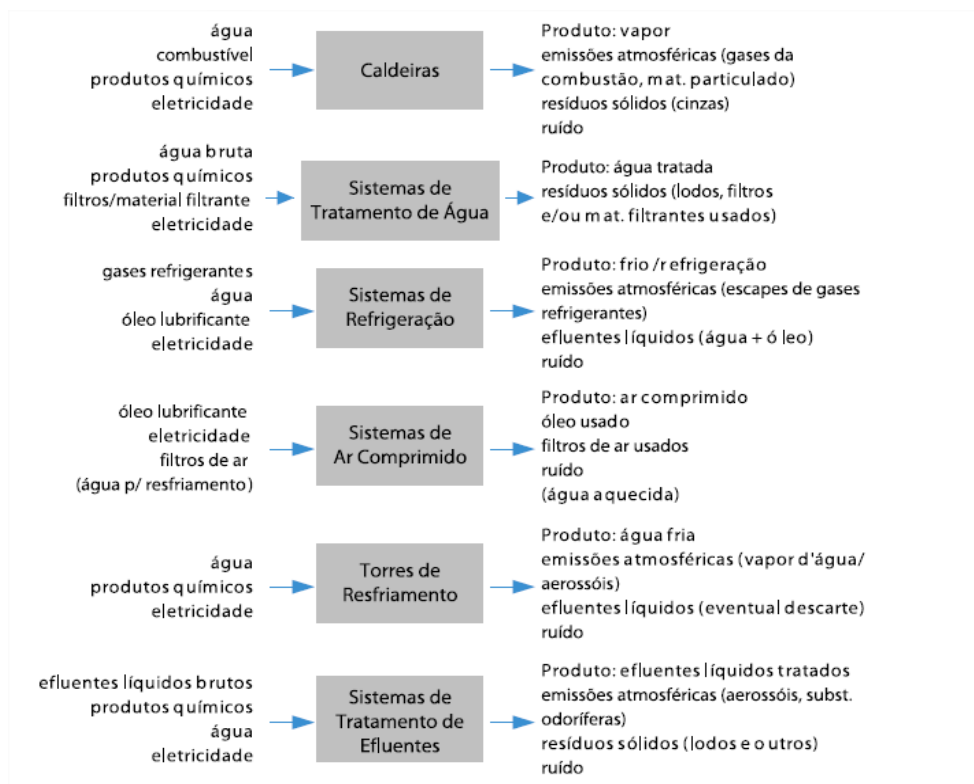
FONTE: A autora (2016).

Como consequência das operações de abate para obtenção de carne e derivados, originam-se vários subprodutos e/ou resíduos que devem sofrer processamentos específicos: sangue, penas, gorduras, aparas de carne, vísceras, animais ou suas partes condenadas pela inspeção sanitária, etc. Pacheco (2006) comenta que normalmente, a finalidade do processamento e/ou da destinação dos resíduos ou dos subprodutos do abate é função de características locais ou regionais, como a existência ou a situação de mercado para os vários produtos resultantes e de logística adequada entre as operações.

Para o reaproveitamento destes materiais, é imprescindível a atenção quanto à segurança alimentar, ou seja, às características da qualidade oculta, aos padrões microbiológicos, à sanidade e ausência de substâncias nocivas incluindo ainda o manejo dos animais e a preocupação com o meio ambiente (TOLEDO, 2001).

Para dar suporte ao processo produtivo, existe a necessidade de processos auxiliares e de utilidades, que são processos essenciais para o funcionamento da planta. A Figura 4 demonstra os principais processos de apoio, os insumos de entrada, produtos e resíduos gerados.

FIGURA 4 – OPERAÇÕES AUXILIARES E DE UTILIDADES EM FRIGORÍFICOS



Fonte: Pacheco (2006).

A caldeira é um gerador de vapor, que é alimentada com um combustível (proveniente de fontes de biomassa ou fóssil), onde recebe água a temperatura ambiente, e transforma em vapor d'água superaquecido. A caldeira é responsável por toda água quente do abatedouro, que será utilizada em processos de escaldagem, depenagem, esterilização de facas, cozimento de subprodutos e resíduos, e também na limpeza de todos os locais, máquinas e equipamentos.

Todos os equipamentos de processo devem ser limpos e higienizados com água quente durante paradas de produção, e após o encerramento do dia de trabalho, como preparação para o dia seguinte. Estas operações de limpeza e desinfecção são normalmente regulamentadas pelas autoridades sanitárias responsáveis pela fiscalização das indústrias alimentícias (PACHECO, 2006).

A quantidade de água consumida nos abatedouros e frigoríficos depende diretamente de sua capacidade de abate e também da tecnologia empregada. De acordo com Silva (2005), para cada ave processada, o consumo de água pode

variar de 15 a 30 L, incluindo a recepção dos animais, aspersão de água sobre as aves e lavagem das gaiolas de transporte.

Percebe-se que o consumo de água na indústria varia muito na literatura, mas o ideal é utilizar esse recurso de forma racional, aproveitando ao máximo a água dos processos, evitando transbordos, vazamentos e desperdícios.

Essa demanda de água gera grande quantidade de efluentes líquidos, contaminados, que necessitam de um tratamento específico (GHANDI, 2005).

2.3 SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS EMPREGADOS EM ABATEDOURO DE AVES

Os despejos de frigoríficos possuem altos valores de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio), que são parâmetros utilizados para quantificar a carga orgânica nos efluentes. Este tipo de efluente apresenta também a presença de óleos e graxas, sólidos dissolvidos e em suspensão, além de fragmentos de carne, gorduras e de vísceras. Possuem ainda residual de compostos utilizados na sanitização e desinfecção, proveniente do processo de higienização de máquinas e equipamentos.

Caso a unidade industrial tenha instalado uma planta de graxaria, este tipo de efluentes também apresentam altas DBO e DQO, além de óleos e graxas. Cabe ressaltar que o sangue possui a DQO mais alta de todos os efluentes líquidos gerados no processamento de carnes (PACHECO, 2006).

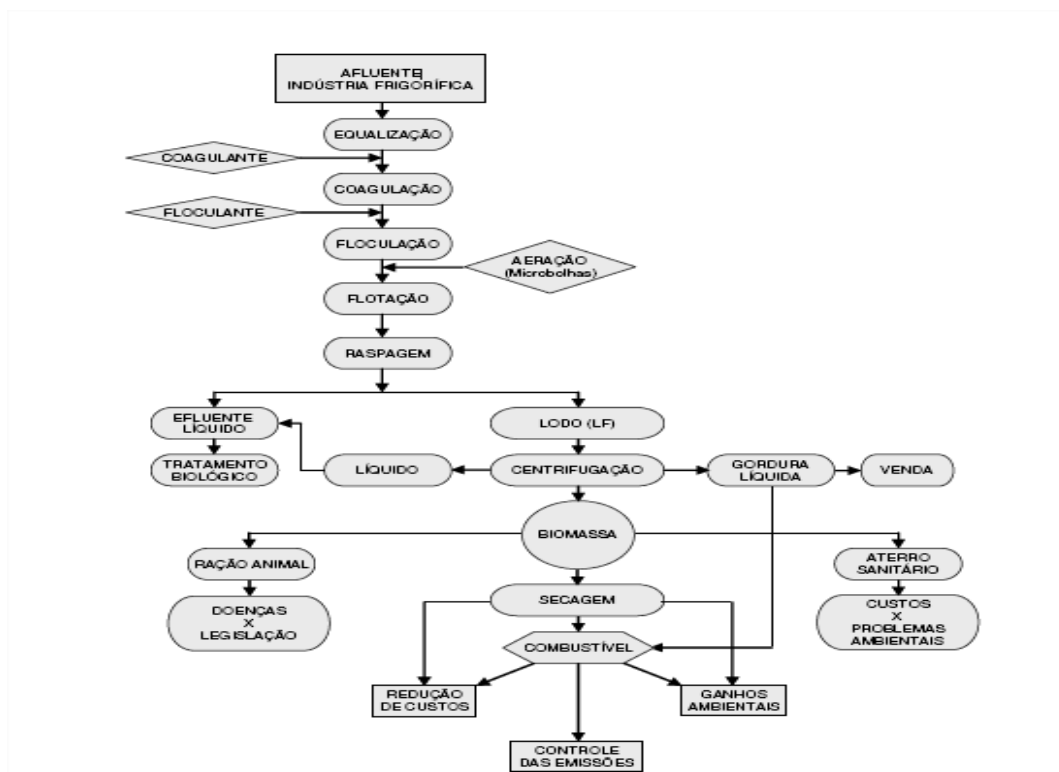
Normalmente o sistema de tratamento de efluentes de frigoríficos de aves divide-se em tratamento primário e secundário. O tratamento primário é composto por peneiramento (estático ou rotativo), tanque de equalização, flotores físico/físico-químicos, seguido de tratamento secundário composto por lagoas de estabilização ou sistema de lodos ativados.

O tratamento primário é a etapa inicial de um processo de tratamento de efluentes, com eficiência esperada de 50% para remoção de sólidos suspensos, 25 a 50% de DBO, 10 a 20% de nitrogênio orgânico e aproximadamente 10% de fósforo. A eficiência pode ser aumentada com a adição de coagulantes e floculantes (LEVINE e ASANO, 2002).

A Figura 5 ilustra um fluxograma com todas as etapas do tratamento primário do sistema de tratamento de efluentes de uma indústria frigorífica e

demonstra a obtenção do lodo considerado neste trabalho como uma biomassa residual.

FIGURA 5 – PROCESSO DE TRATAMENTO PRIMÁRIO DE EFLUENTES



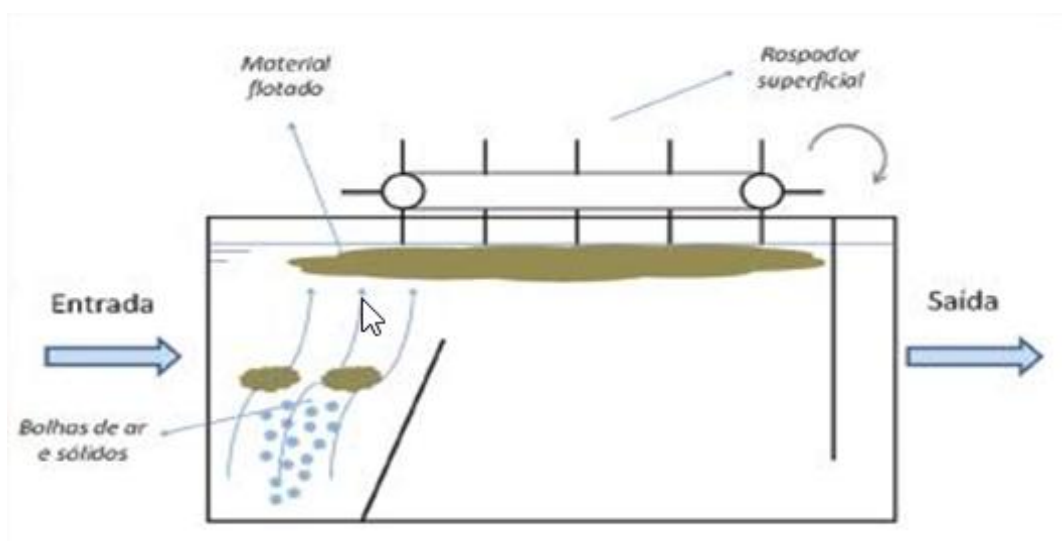
Fonte: Sena (2005).

2.3.1 Processo de Flotação Físico Química

A flotação tem como princípio remover o máximo de sólidos existentes no efluente por meio da adição de coagulantes e coadjuvantes de coagulação, seguida pela adesão dessas partículas às bolhas que ascendem nos tanques de flotação, formando o lodo flotado. O lodo que sobe permanece flutuando e é removido através de pás (SENA, 2005).

A figura abaixo demonstra a formação do lodo dentro de um flotador após a adição dos respectivos coagulantes e floculantes. Após a inserção de microbolhas de ar, os flocos formados sobem para a superfície do equipamento, sendo retirado através de um raspador superficial.

FIGURA 6 – PROCESSO DE FLOTAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA



Fonte: EQMA Engenharia e Consultoria (2013).

O lodo flotado é formado devido à dosagem de produtos químicos (polímero e coagulante) no efluente bruto e da injeção de microbolhas de ar no flotador. Este lodo pode ser considerado uma biomassa residual de alto poder calorífico, já que sua composição é formada por todo material presente no efluente líquido que coagulou e floculou dentro do flotador.

FIGURA 7 – SAÍDAS DO PROCESSO DE FLOTAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA



Fonte: A autora (2016).

A figura (a) acima ilustra a saída do efluente já clarificado, assim como a figura (b) demonstra a raspagem do lodo flotado que será enviado para processamento.

Cabe ressaltar que caso o efluente líquido proveniente do flotador ainda não tenha alcançado os parâmetros mínimos necessários exigidos pela legislação ambiental, o mesmo deve ser direcionado para tratamento posterior. Normalmente os processos subsequentes são biológicos, tais como, lagoas anaeróbias seguida de lagoas aeradas, sistema de lodos ativados, entre outros.

2.3.2 Coagulantes utilizados no Processo de Flotação Físico Química

Os principais coagulantes inorgânicos utilizados em sistemas de tratamento primário de efluentes frigoríficos são compostos por sais de alumínio e ferro, polímeros sintéticos, cujas dosagens variam amplamente no intuito de se atingir uma maior eficiência de remoção de matéria química usando dosagens mínimas em valores de pH ótimos (SENA, 2005)

A tabela abaixo apresenta os principais coagulantes comerciais indicados para tratamento primário de efluentes líquidos e as faixas de pH para uma ótima coagulação.

TABELA 1 – PRINCIPAIS COAGULANTES E INTERVALOS DE pH ÓTIMOS

Coagulante	Faixa de pH
Cloreto Férrico	5,0 a 11,0
PAC (Policloreto de Alumínio)	3,0 a 11,0
PoliDADMAC	5,0 a 8,0
Sulfato de Alumínio	5,0 a 8,0
Sulfato Ferroso	8,5 a 11,0
Sulfato Férrico	5,0 a 11,0

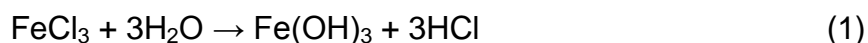
Fonte: Adaptado de Pavanelli (2001).

2.3.2.1 Cloreto Férrico

O Cloreto férrico é um coagulante amplamente utilizado na coagulação de efluentes frigoríficos. Possui como outras designações os termos: Percloreto de Ferro, Tricloreto Férrico, Ferro (III) cloreto.

A reação a quente do ácido clorídrico concentrado com o minério de ferro (hematita- Fe_2O_3), seguido de resfriamento e filtração proporciona a produção de cloreto férrico (FeCl_3) com elevado índice de pureza. A concentração final comercial do produto é de aproximadamente 40% em peso de FeCl_3 (PAVANELLI, 2001). O produto apresenta-se como um líquido marrom avermelhado com pH próximo de 2,0 (a 20 °C), densidade variável de 1,380 a 1,420 g/cm³ e altamente corrosivo.

A equação 1, refere-se à reação de hidrólise do cloreto férrico, sendo esta, a responsável pela formação de hidróxido de ferro, que possui ação coagulante sobre as partículas:



A utilização de FeCl_3 possui uma grande eficiência em redução de DQO, DBO, cor, turbidez, quantidade de sólidos suspensos, e no caso de frigoríficos e abatedouros, óleos e graxas no efluente após processo de coagulação/floculação.

2.3.2.2 Coagulante Orgânico

Em determinados casos, o emprego de um polímero catiônico pode ser mais apropriado que um sal de alumínio ou de ferro. A definição de qual polieletrólito catiônico deve ser utilizado como coagulante primário depende de sua massa molar, densidade de carga, dosagem requerida, condições de mistura e do tamanho predominante das partículas presentes na água (Di Bernardo e Dantas, 2005).

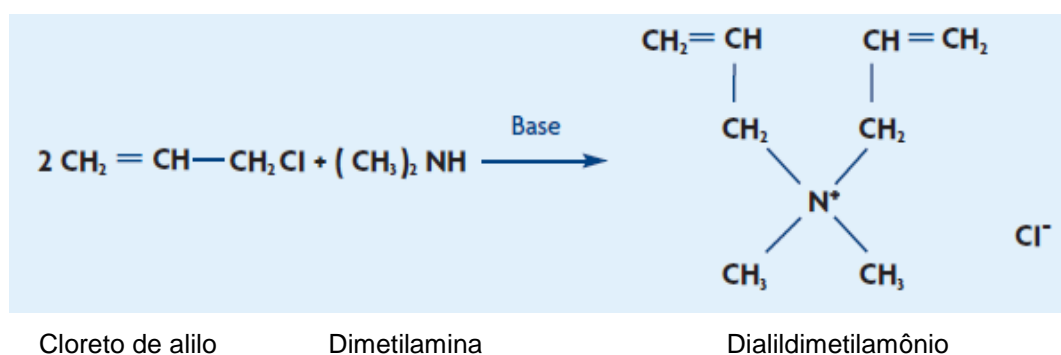
Poliaminas e o polidialildimetilamônio (poliDADMAC) são muito utilizados em diversos países como coagulantes orgânicos, para o processo de coagulação e sedimentação, devido ao pouco efeito no pH da água bruta (Bae et al., 2007).

PoliDADMAC é um polímero catiônico com densidade elevada de carga, adequado para utilização em processo de floculação em estação de tratamento de água e esgoto.

O monômero de DADMAC é formado por reação de dois equivalentes de cloreto de alilo com dimetilamina. PoliDADMAC é então sintetizado por polimerização de radical de DADMAC com um peróxido orgânico utilizado como um catalisador. Duas estruturas poliméricas são possíveis quando a polimerização de DADMAC: estrutura piperidina N-substituído ou estrutura pirrolidina N-substituída. Normalmente a estrutura de pirrolidina é favorecida (JOHN, 2002).

Na Figura 08, se apresenta as reações de formação do polímero catiônico poliDADMAC.

FIGURA 8 – REAÇÃO DE FORMAÇÃO DO POLIDADMAC



Cloreto de alilo

Dimetilamina

Dialildimetilamônio

FONTE: John (2002).

2.3.3 Floculação no Processo de Flotação Físico Química

Após a adição do coagulante, ocorre a etapa da floculação, na qual é necessária a adição de um polímero.

A floculação consiste na agregação das partículas já desestabilizadas, resultante do choque entre as mesmas, formando partículas maiores e mais densas (microflocos), passíveis de separação (SCHOENHALS, 2006).

Os polímeros ou polieletrólitos são constituídos de monômeros simples que são polimerizados às substâncias de alto peso molecular com pesos moleculares. Os polímeros podem variar no peso molecular, estrutura, intensidade de carga, tipo de carga e composição. A intensidade da carga depende do grau de ionização dos grupos funcionais, o grau de copolimerização e/ou da quantidade de grupos substituídos na estrutura do polímero (WAKEMAN e TARLETON, 1999).

Há três tipos de polímeros que podem ser utilizados: catiônico, aniônico e naniônico. O catiônico é aquele que quando dissolvido em água se ioniza, adquire

carga positiva e atua como um autêntico cátion. O aniônico, de maneira semelhante, adquire carga negativa e atua como ânion. O naniônico é aquele que não se ioniza em água (SCHOENHALS, 2006).

Adicionando-se um excesso de polímero catiônico a uma água a ser clarificada, as partículas suspensas irão adquirir cargas positivas e permanecerão dispersas na água. Posteriormente é necessário neutralizar com cuidado o excesso de cargas positivas usando-se um polímero aniônico. Assim, ocorrerá a aglutinação das partículas e a consequente clarificação da água (DI BERNARDO, 1993).

O processo de coagulação seguido de floculação que ocorre na flotação físico-química resulta na remoção de DBO, DQO, Óleos e Graxas e na clarificação do efluente, consequentemente gera-se o lodo flotado.

2.3.4 Processamento do lodo gerado no sistema de Flotação Físico-química

Um tratamento comum utilizado para a desidratação do lodo flotado é o aquecimento e cozimento deste lodo em aproximadamente 95 °C, onde posteriormente o mesmo é bombeado para um decanter centrífugo que realiza a separação em três fases diferentes (tridecarter) através da densidade dos materiais, sendo separados: gordura líquida (óleo), clarificado (efluente líquido residual), e o lodo desidratado. Sendo que este último apresenta um percentual de umidade que varia de 60 a 70% dependendo dos ajustes de processo e regulagem do equipamento utilizado.

FIGURA 9 – EQUIPAMENTO DECANter 3 FASES



Fonte: A autora (2016).

FIGURA 10 – VISTA INTERNA DECANTER 3 FASES



Fonte: Adaptado de Flottweg (2009).

O decanter é constituído por um conjunto rotativo e uma estrutura fixa, onde o conjunto rotativo é composto por um tambor cilindro/tronco-cônico, um caracol transportador e um redutor de engrenagens que proporciona o diferencial de rotação entre o tambor e o caracol.

O funcionamento do decanter é caracterizado pela ação da força centrífuga, que quando aplicado ocorre a determinada força G , que realiza a separação de fases com densidades diferentes. A separação sólido-líquido acontece no interior de um tambor rotativo com formato cilíndrico tronco-cônica, em cuja superfície se deposita a fase sólida, mais pesada, que é descarregada de maneira contínua pela rosca interna. O lodo flotado após o cozimento entra pelo tubo de alimentação e chega até a parte central da rosca, no qual é descarregado. Este, por sua vez, gira com número de rotações um pouco inferior do que o tambor. Com o efeito da força centrífuga, as partículas sólidas vão se acumulando na parede do tambor, as quais são transportadas em direção à extremidade mais estreita. No extremo do tambor os sólidos são centrifugados para a calha de retenção. A fase líquida purificada e clarificada sai por via de pentes sem exercício de pressão, e o óleo é coletado através de sistema hidráulico que regula o nível dentro do equipamento.

Todo o conjunto é acionado por um motor elétrico que transmite o movimento através de polias e correias, o conjunto rotativo está mancalizado em dois pontos apoiados sobre mancais de rolamento.

Sena (2005) comenta que na saída do tratamento físico-químico do efluente gerado em um frigorífico pode-se obter cerca de 2% de gordura líquida, 20% de lodo

já desidratado, e cerca de 78% de efluente líquido. Sendo que o lodo é constituído de umidade, fração gordurosa remanescente e resíduo sólido orgânico.

2.4 USO DA BIOMASSA RESIDUAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

2.4.1 Biomassa residual e processos de conversão

A biomassa sempre foi e continuará sendo uma importante fonte de energia para a humanidade. Ela é a forma natural de armazenar uma fração da energia solar incidente no planeta. O grande desafio da humanidade é buscar soluções para utilizar esse recurso natural de forma cada vez mais eficiente (BRASIL, 2007).

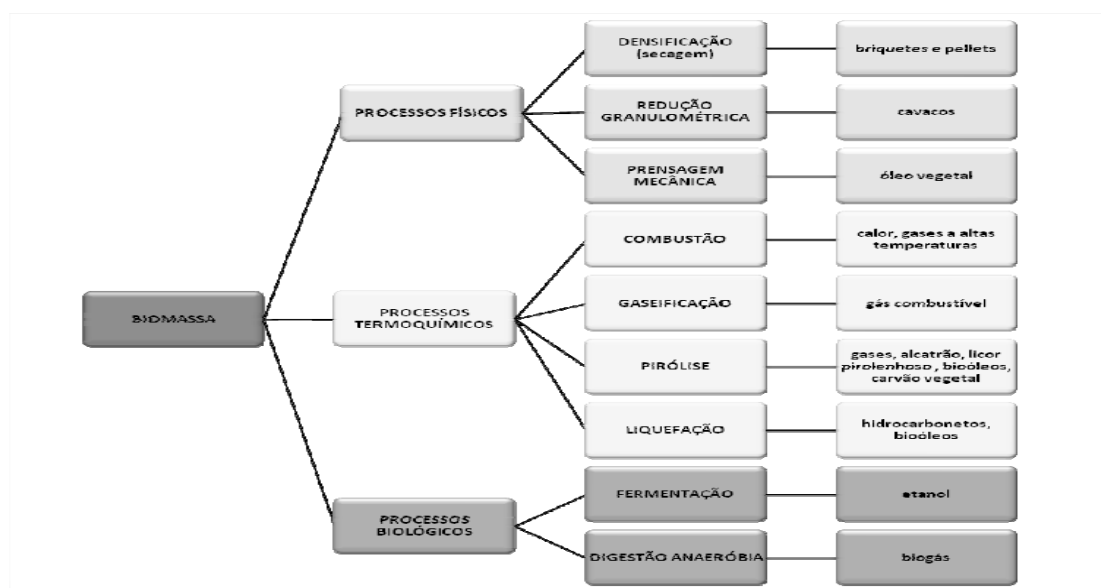
A biomassa residual pode ter origem em resíduos sólidos agrícolas, urbanos e industriais, e quando voltada para fins energéticos, abrange a utilização desses resíduos para a geração de fontes alternativas de energias (CORTEZ et al., 2008).

Diversas outras biomassas, além do bagaço, da lixívia e da lenha, também podem ser utilizadas para geração de energia, seja elétrica ou térmica. O aproveitamento energético de resíduos da agricultura e da pecuária além de disponibilizar uma fonte de energia limpa, sustentável e, potencialmente economicamente atrativa, agrega valor às cadeias produtivas de base rural (EPE, 2016).

O emprego da biomassa pode ser feito de algumas formas, como a combustão direta, com ou sem processos físicos de secagem, classificação, compressão, corte, entre outros. Outra forma seria por meio de processos termoquímicos, ou seja, a gaseificação, a pirólise, a liquefação e transesterificação, ou ainda por processos biológicos, como a digestão anaeróbia e fermentação (SILVA e SAES, 2005). A aplicação desses biossólidos como combustível está intimamente ligada às suas características físicas e químicas e ao seu comportamento diante das condições de rotas tecnológicas (ZHENG, 2000).

Na Figura 11 se apresenta um fluxograma demonstrando os processos básicos de conversão da Biomassa.

FIGURA 11 – PROCESSOS BÁSICOS DE CONVERSÃO DENDROENERGÉTICA DA BIOMASSA



FONTE: Nogueira e Lora (2003).

Os métodos termoquímicos baseiam-se na utilização de calor como fonte de transformação da biomassa. São métodos desenvolvidos para a conversão da biomassa residual obtida a partir das atividades agrícolas e florestais e das indústrias de transformação agroalimentar e da madeira (BRÁS et al., 2008).

Para Virmond (2007), são as características da fonte de biomassa que irão determinar a escolha do processo de conversão, e dessa forma o conhecimento de suas propriedades físico-químicas é importante para se determinar o uso da mesma como fonte de energia.

Conforme Brás e colaboradores (2008), a transformação da biomassa origina diferentes tipos de energia, como, a energia térmica. O sistema de combustão direta pode ser utilizado na cocção de alimentos, no aquecimento e na secagem, podendo aproveitar o vapor para produção de eletricidade, já a energia elétrica, é obtida por meio da transformação da biomassa proveniente de culturas energéticas e de resíduos industriais e por fim a energia mecânica, resultado da utilização dos biocombustíveis, que permitem substituir, total ou parcialmente os combustíveis fósseis.

O uso energético de resíduos agroindustriais é obtido na maioria dos casos, por meio da queima direta em fornos e caldeiras ou, de maneira mais inovadora, através da biodigestão anaeróbia. O que determina qual o processo de conversão

energética a ser utilizado é o teor de umidade, pois em termos práticos, só é possível queimar resíduos com até 50% de umidade (CORTEZ et al, 2008).

2.4.2 Caldeira

Segundo a Norma Regulamentadora 13, do Ministério do Trabalho (NR 13), caldeiras são “[...] equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refratedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo” (BRASIL, 1995).

Para Lammers e colaboradores (2004), uma caldeira é um recipiente fechado em que a água, sob pressão, é transformada em vapor pela aplicação de calor. Na fornalha, a energia química do combustível é convertida em calor, e é função da caldeira transferir esse calor para a água da maneira mais eficiente. Assim, a função principal de uma caldeira é gerar vapor a pressões acima da pressão atmosférica, pela absorção do calor que é produzido pela queima de combustíveis. As caldeiras podem ser classificadas de acordo com classes de pressão, grau de automatização, tipos de energia empregada e tipo de troca térmica.

Após ocorrer a combustão, o calor é aproveitado, e os gases provenientes da combustão incompleta são descartados na atmosfera através da chaminé.

2.4.3 Combustão da Biomassa

A combustão é um processo químico no qual um oxidante reage rapidamente com um combustível, liberando energia térmica, geralmente na forma de gases/produto de combustão a altas temperaturas, a finalidade deste processo é principalmente a obtenção de calor (GARCIA, 2002).

A combustão pode ser definida como uma reação química exotérmica rápida entre duas substâncias, sendo um combustível e o outro um comburente. Considerando que as reações exotérmicas são aquelas que liberam energia térmica. O combustível é a substância que queima, que se oxida, contendo em sua composição, principalmente, carbono e hidrogênio, e, eventualmente e em menores teores, outros elementos reagentes, como oxigênio e enxofre, ou ainda outros compostos que não participam da reação de combustão, como a água. O comburente é o componente da reação de combustão que fornece o oxigênio. Em

geral, é usado o ar atmosférico, que apresenta a grande vantagem de não ter custo de fornecimento.

Conforme Hilsdorf e colaboradores (2004 apud AZZOLINI, 2010), os principais elementos químicos encontrados na maioria dos combustíveis são carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre. Os produtos da combustão são tipicamente gasosos. Contudo, os elementos do combustível que não se oxidam ou já estão oxidados vão constituir as cinzas.

Para Gomes (1980), combustão é um processo destrutivo das moléculas carbonadas da biomassa, ocorrendo com excesso de oxigênio, resultando em aumento de temperatura e liberação de energia. O autor considera que o teor de umidade é um fator relevante na eficiência da combustão, pois quanto maior a umidade, menor é a eficiência do processo, e menor a energia útil, pois parte da energia de combustão será utilizada para a vaporização da água.

No quadro abaixo encontram-se resumidas as reações elementares para o estudo da combustão, correspondentes respectivamente, à oxidação completa e incompleta do carbono, à oxidação do hidrogênio e à oxidação do enxofre. É apresentado também o calor liberado em cada reação, por unidade de massa do combustível.

QUADRO 1 – REAÇÕES BÁSICAS DE COMBUSTÃO

REAGENTES		PRODUTOS	ENERGIA LIBERADA
$C + O_2$	\rightarrow	CO_2	+ 8.100 kcal/kg C
$C + 1/2 O_2$	\rightarrow	CO	+ 2.400 kcal/kg C
$2 H_2 + O_2$	\rightarrow	$2 H_2O (l)$	+ 34.100 kcal/kg H_2
$S + O_2$	\rightarrow	SO_2	+ 2.200 kcal/kg S

FONTE: ELETROBRAS (2005).

Deve ser observado no quadro acima que para cada caso deverá existir uma quantidade determinada de oxigênio, ou seja, de ar a ser fornecido. A combustão completa ocorre quando todos os elementos combustíveis contidos no combustível (C, H, S, etc.) se combinam com o oxigênio do ar, fornecendo os produtos finais correspondentes quimicamente estáveis. Neste sentido, a segunda reação

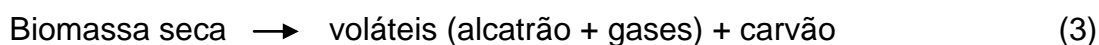
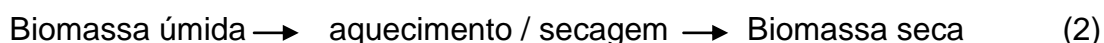
apresentada para o carbono, com a formação do monóxido de carbono (CO), representa uma reação incompleta.

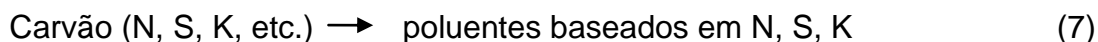
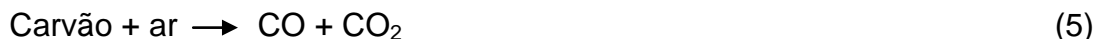
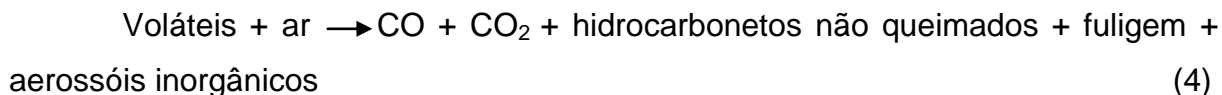
Fica ainda evidente que a queima parcial do carbono libera bem menos energia que sua total oxidação. Na queima do hidrogênio, a água formada pode estar como líquido ou como vapor, sendo apresentada nessa tabela a energia liberada quando está na forma líquida. A proporção exata de ar e combustível para uma combustão completa é conhecida como relação ar/combustível estequiométrica, uma propriedade característica de cada combustível (ELETROBRÁS, 2005).

Quando a combustão de biomassa é completa, as substâncias liberadas além do calor são água e dióxido de carbono. Entretanto, na prática, a combustão nunca é completa e com isto, existe a liberação também de combustível residual (partículas de carbono), monóxido de carbono e outros produtos considerados poluentes, como hidrocarbonetos, óxido de nitrogênio e óxido de enxofre (SOARES, 1995).

Simoneit (2002) explica que quando a biomassa é aquecida, os seus constituintes começam a hidrólise, a oxidação, a desidratação e a pirólise. Com o aumento da temperatura ocorre a formação de compostos voláteis, alcatrão e carvão. Os compostos resinosos e produtos de decomposição da celulose, hemicelulose e lignina juntamente com o vapor de H_2O são removidos, ocorrendo uma combustão tanto parcial (incompleta) como completa na zona de chama. Durante a fase de chama ocorre continuamente a carbonização até que o fluxo de combustível volátil diminua abaixo do nível mínimo necessário para a propagação de uma chama. Durante o processo de combustão o calor produzido é o suficiente para propagar o processo de carbonização, assim como o lançamento de outros voláteis provenientes da decomposição da biomassa.

Williams e colaboradores (2012) mencionam que a combustão de biomassa consiste em seis etapas, conforme representadas nas equações estequiométricas apresentadas a seguir:





Segundo Virmond (2007), as taxas de combustão da biomassa dependem de vários fenômenos físicos, dentre esses dois fatores predominantes são as taxas de transferência de calor e a taxa cinética de reação. Três diferentes processos que interagem entre si são distinguíveis no processo de combustão de biomassas: pirólise do sólido (formação de compostos voláteis e sólido rico em carbono); queima de compostos voláteis e queima do resíduo sólido final. A combustão do material sólido carbonoso e da fase gasosa têm mecanismos cinéticos e químicos completamente diferentes. O tamanho de partícula determina a taxa de transferência de calor. A queima da matéria volátil é geralmente rápida e procede tão rapidamente quanto a liberação de voláteis, enquanto que a oxidação do carvão ocorre muito mais lentamente.

O tipo de biomassa amplamente utilizado em caldeiras são os cavacos de madeira. O cavaco é um recurso renovável, composto por lascas obtidas a partir de toras de madeira, e na sua maioria são provenientes de reflorestamento. Apresenta aproximadamente um valor de poder calorífico inferior de 2.500 kcal/kg, massa específica de 330 kg/m³ e teor de enxofre em valor mínimo (ARRUDA, 2009).

Segundo Macedo (2006), a geração de energia através da combustão de cavacos torna a queima mais limpa, pois não possuem compostos formadores de poluentes como enxofre e nitrogênio. Porém, como desvantagens o cavaco de eucalipto possui um teor de umidade mediano, cerca de 50%, possuindo um poder calorífico bem menor quando relacionado com os combustíveis fósseis.

Quanto menor o teor de umidade dos resíduos madeiros, maior será a produção de calor por unidade de massa. A presença de água tem influência negativa no poder calorífico, pois parte da energia liberada é gasta na vaporização

da água e se o teor de umidade for muito variável, pode dificultar o processo de combustão, havendo necessidade de constantes ajustes no sistema (BRITO, 1986).

Os produtos da combustão, também chamados de gases de combustão, são aqueles resultantes das reações que ocorrem durante o processo de combustão. Entre os diversos gases que podem ser formados estão: CO_2 , H_2O (vapor), SO_2 , SO_3 , CO , NO_x , entre outros. Na combustão de sólidos e líquidos, além de gases, também podem ser liberados materiais particulados (FELDER e AZZOLINI, 2013).

As emissões dos óxidos de enxofre são atribuídas diretamente ao tipo e a qualidade do combustível, sendo independente do projeto ou operação do equipamento de combustão. A emissão de CO , assim como a dos outros materiais oxidáveis, está associada à eficiência da combustão. Altas concentrações de CO nos gases de combustão indicam queima incompleta, ou seja, baixa eficiência de combustão e perda de calor (FEAM, 2014).

Em sistemas de combustão, a maioria dos metais encontrados em resíduos não são tóxicos, como o ferro e o alumínio. A emissão de metais na atmosfera também depende da taxa de alimentação e da concentração de cada metal encontrado no combustível. O metal pode reagir com matéria mineral, como silicatos, para formar compostos estáveis que por sua vez não vaporizam. O metal também pode sofrer transformação física e ser capturado por partículas de cinzas (FLORIANI, 2007).

Durante a combustão o cloro contido no combustível em sua grande maioria forma HCl e Cl_2 . Sendo que o HCl é termodinamicamente estável e deve ser removido, pois em grandes quantidades causa tanto corrosão de equipamentos como problemas respiratórios nos seres vivos expostos, devido a sua influência na formação de dioxinas e furanos (OBERNBERGER et al., 2006).

2.4.4 Aproveitamento térmico do lodo gerado no abatedouro de aves

O lodo desidratado, proveniente do tratamento de efluentes líquidos gerados em abatedouro de aves, é considerado como uma biomassa de alto poder calorífico, essencialmente de origem orgânica, podendo-se gerar energia através da sua combustão direta, sendo esta, uma alternativa para a redução do impacto ambiental

causado por indústrias de carnes, além da redução de custos para disposição final adequada (SENA, 2005).

Para Virmond (2007) tanto o lodo, quanto a gordura líquida (óleo ácido) provenientes do processo de centrifugação do lodo flotado, são materiais com potencial para serem utilizados como fonte de energia. Portanto, tanto o lodo quanto a gordura podem ser submetidos à combustão direta, constituindo fontes renováveis de energia disponíveis a custos relativamente baixos comparado aos combustíveis primários.

Segundo KAMPMAN e colaboradores (2004), o aproveitamento do lodo resultante do tratamento de efluentes como fonte de energia pela indústria de carnes pode proporcionar tanto um destino mais nobre a esses resíduos, como ganhos energéticos e econômicos quanto à aquisição de combustíveis. A combustão de biomassas e combustíveis primários é uma opção atrativa para aumentar a utilização de energias renováveis.

Para SENA (2005), a incineração do lodo do tratamento de efluentes, pode ser utilizada para a geração de energia, o que proporciona tanto um destino mais nobre a estes resíduos, como vantagens econômicas quanto à aquisição de combustíveis. No entanto, diversos parâmetros referentes ao controle da combustão devem ser monitorados devido à formação de compostos poluentes durante a queima, tais como dioxinas e furanos, VOC's, NO_x , SO_2 e ácidos, que são importantes poluentes gasosos e líquidos de origem natural ou antropogênica, além das cinzas, principal poluente sólido.

VIRMOND (2007) considera também que a escolha do coagulante utilizado no tratamento primário do efluente frigorífico é determinante da composição do lodo e, conseqüentemente, da ocorrência de problemas de formação de depósitos e incrustação no sistema de combustão. Quanto menor a proporção de lodo na mistura a ser queimada, menor a ocorrência desses problemas. A respectiva autora avaliou que a partir da caracterização completa das biomassas cavaco e lodo frigorífico e da realização de testes de combustão, verificou-se o potencial de utilização do lodo seco em secador rotativo apresentando aproximadamente 15% de umidade como fonte de energia em processos de combustão, sendo que em seu estudo evidenciou que a incorporação de 10% em peso de lodo frigorífico à alimentação da caldeira, verificou-se aumento da potência térmica nominal do

sistema em aproximadamente 2%, passando de 14,06 MW para 14,29 MW. Estimando desta forma uma economia de 10% no consumo anual de cavaco.

Embora, o uso de lodos de estações de tratamento de efluentes como combustível alternativo na co-geração de energia vem sendo estudado por diversos autores, porém sua aplicação ainda não está bem difundida (SENA et al., 2007).

2.5 COMPOSIÇÃO DE BIOMASSA COMBUSTÍVEIS

Para determinar a potencialidade de um combustível, deve-se primeiramente conhecer suas características químicas e térmicas fundamentais, ou seja, sua composição química e seu potencial calórico. Essas características fundamentais são composição elementar, composição imediata e poder calorífico (CORTEZ et al., 2008).

A natureza do lodo depende do processo empregado no tratamento do esgoto e da fonte geradora. Portanto, o lodo pode conter significativas quantidades de substâncias tóxicas, como metais pesados, substâncias orgânicas e micro-organismos patogênicos (JINDAROM et al., 2007).

Para a utilização de resíduos como fonte alternativa de energia, o conhecimento de suas propriedades e características químicas é essencial, de modo a permitir o projeto do sistema de combustão, bem como de todos os processos necessários para a limpeza dos gases de exaustão e destinação final dos resíduos sólidos (BORK, 2011).

O quadro 2 realiza uma comparação entre estudos realizados por outros autores sobre a composição elementar e poder calorífico de biomassas residuais provenientes de sistemas de tratamentos de efluentes líquidos de abatedouro de aves.

QUADRO 2 – COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR E PODER CALORÍFICO DE BIOMASSAS RESIDUAIS

Autores		SENA (2005)	SENA (2005)	VIRMOND (2007)	Tarnawski (2004)	Macedo (2006)
Biomassa		Lodo Cloreto Férrico	Lodo Sulfato Férrico	Lodo	Lodo papel	Lodo Papel e Celulose
Análise Elementar	C	54,59	57,8	50,9	12,5	13,39
	H	7,6	7,6	7,9	1,63	2,14
	N	8,22	5,99	8,1	0,26	0,21
	S	ND	0,62	<0,30	0,11	0,05
	O	23,85	22,56	20,24	15,2	17,5
	CL	NA	NA	0,16	0,006	0,005
PCS (kcal/kg)		5575	5861	5835*	NA	NA
PCI (kcal/kg)		5979	6265	5400*	4200	3880

* dados transformados de MJ para Kcal.

FONTE: A autora (2016).

2.5.1 Poder Calorífico

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor liberada pela combustão completa do combustível, por unidade de massa (ex: kcal/kg) ou de volume (ex: kcal/m³) nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP). O valor deste parâmetro varia de acordo com o teor de umidade da biomassa. Portanto, o poder calorífico de um energético qualquer pode ser definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa combustível, podendo ser expresso em kJ/kg. (CORTEZ et al., 2008).

A energia térmica fornecida durante a queima dos combustíveis pode ser avaliada por seu poder calorífico. Sendo que a água, usualmente presente nos produtos de combustão, resultante da oxidação do hidrogênio, pode apresentar-se em diferentes estados (líquido e vapor). Desta forma são definidos dois tipos de poder calorífico: o Poder Calorífico Superior (PCS), quando a água está na forma líquida, estado típico nas condições de ensaio de combustíveis, pouco aplicado em situações práticas; e Poder Calorífico Inferior (PCI), quando a água apresenta-se

como vapor, situação que efetivamente ocorre nos produtos de combustão nas chaminés (ELETROBRÁS, 2005).

Portanto, o calor liberado pela combustão de uma unidade de massa de um combustível em um volume constante, com toda água condensada (no estado líquido), é denominado PCS.

A diferença entre o PCS e o PCI é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível e a água de formação obtida a partir da oxidação do hidrogênio do combustível (CORTEZ et al., 2008).

Para uma boa combustão, o combustível deve possuir baixos teores de umidade e cinzas, elevado teor de carbono fixo e de material volátil, além de alto PCS (RIBEIRO, 2002).

2.5.2 Análise Elementar

A análise elementar descreve os elementos químicos em porcentagem, apresentando os parâmetros como o teor de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S), oxigênio (O) e cinzas. Quanto maior o teor de C e H, melhor será a combustão, enquanto altos teores de N e S poderão resultar em altos índices de emissões de NO_x e SO_2 (RIBEIRO, 2002).

Na literatura técnica, geralmente os dados de composição elementar e imediata, são apresentados em base seca (b.s), para torna-los de aplicação geral, independente da umidade do combustível (CORTEZ et al., 2008).

O carbono (C) e o hidrogênio (H) são oxidados durante a combustão por reações exotérmicas (formação de CO_2 e H_2O). A biomassa é altamente oxigenada (30 a 40% em b.s.) comparada a combustíveis fósseis convencionais incluindo hidrocarbonetos líquidos e carvões. O constituinte majoritário da biomassa é o carbono (30 a 60% em b.s.) dependendo do teor de cinzas; seguido do hidrogênio (5 a 6% em b.s.), de nitrogênio, enxofre e cloro, esses usualmente presentes em teores inferiores a 1% em b.s. (VIRMOND, 2007).

2.5.3 Análise Imediata

A análise imediata consiste na determinação da umidade, cinza, matéria volátil e carbono fixo (por diferença) por métodos normalizados (BORK, 2011).

Esta análise pode ser determinada utilizando as normas ASTM Standard Methods for the Ultimate Analysis of Coal and Coke, D3172-73 e D3175-73 (ASTM, 1983 apud Teixeira e Lora, 2004).

2.5.3.1 Umidade

A umidade do combustível é fator limitante na combustão de biomassa devido ao seu efeito sobre o PC. A reação de combustão é exotérmica, mas a evaporação da água é fortemente endotérmica. O limite autotérmico para a maioria das biomassas combustíveis é próximo a 65% de umidade (massa de água por massa de combustível úmido). Acima desse ponto, energia insuficiente é liberada pela combustão para satisfazer a evaporação e a produção de calor (VIRMOND, 2007).

Se o combustível apresentar um elevado teor de umidade pode resultar em uma ignição pobre, redução da temperatura de combustão e dificultar a combustão dos produtos de reação e, conseqüentemente, afetar a qualidade da combustão.

2.5.3.2 Materiais Voláteis

Segundo Williams e colaboradores (2012), o teor de voláteis da biomassa contribui normalmente com cerca de 70% do calor da combustão. Portanto, conclui-se que a combustão de voláteis domina em processos de combustão de biomassa.

Os materiais voláteis possuem um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão da biomassa, além de determinarem a estabilidade da chama durante a combustão. Quanto maior o teor de materiais voláteis, maior a velocidade de queima e menor a estabilidade da chama (CORTEZ et al., 2008).

2.5.3.3 Cinzas

A ação do calor sobre a madeira, que é um material predominantemente orgânico, implica na sua total degradação. Como consequência, há o surgimento de

uma pequena fração residual que é chamada de cinzas, e que corresponde aos elementos minerais minoritários originalmente presentes na madeira (BRITO, 1990).

Ou seja, são os resíduos resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidações dos inorgânicos. As cinzas podem conter elementos metálicos já presentes no combustível, tais como argila, areia e sais que possam estar na biomassa. Dentre os principais constituintes das cinzas destacam-se o cálcio, potássio, magnésio, sulfato, fosfato, carbonato, silicato e pequenas quantidades de outros elementos (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008).

Segundo McKendry (2012) a energia do combustível é reduzida em proporção à magnitude do teor de cinzas.

2.5.3.4 Carbono Fixo

O carbono fixo é o resíduo combustível deixado após a liberação do material volátil. Compõe-se principalmente de carbono, embora possa conter outros elementos não liberados durante a volatilização (BIZZO, 2003).

Trata-se da massa restante após a liberação dos materiais voláteis, excluindo as cinzas e a umidade. Compõe-se principalmente de carbono, embora possa conter outros elementos não liberados durante a volatilização (MCKENDRY, 2002).

2.5.4 Análise Térmica Diferencial

Nos sistemas termoanalíticos a amostra é colocada em um ambiente cuja temperatura é controlada por um dispositivo programador e suas alterações são monitoradas através de um transdutor adequado que produz um sinal elétrico de saída análogo à transformação ocorrida. Este sinal de saída após a amplificação adequada é aplicado a um instrumento de leitura. O programador de temperatura pode ser ajustado para manter constante a temperatura da amostra (operação isotérmica) ou pode ser ajustado para fazer com que a sua temperatura varie linearmente com o tempo (IONASHIRO, 2005).

Segundo Denari (2012), a análise térmica diferencial (ATD) pode ser definida como a técnica que determina continuamente a diferença entre as temperaturas da amostra e de um material de referência termicamente inerte, a medida em que ambos materiais vão sendo aquecidos ou resfriados em um forno.

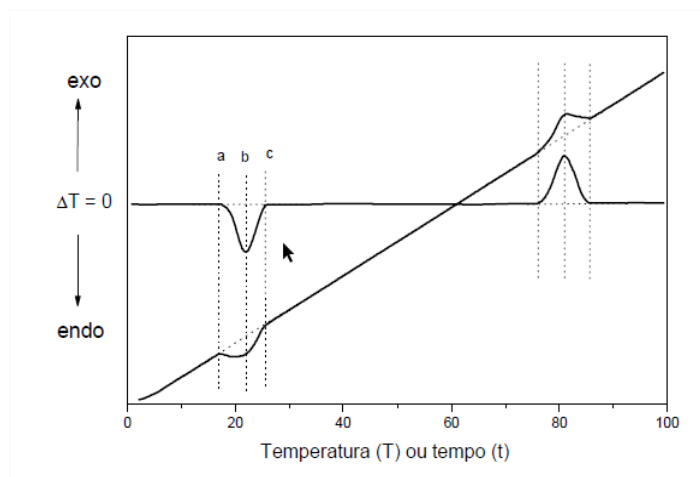
Estas medições de temperatura são diferenciais, pois registra-se a diferença entre a temperatura da referência (T_r), e da amostra T_a , ou seja ($T_r - T_a = \Delta T$), em função da temperatura ou do tempo, dado que o aquecimento ou resfriamento são sempre feitos em ritmo linear ($dT/dt = Cte$) (IONASHIRO, 2005).

Segundo Ionashiro (2005), através dessa técnica, pode-se acompanhar os efeitos de calor associados com alterações físicas ou químicas da amostra, tais como transições de fase (fusão ebulição, sublimação, congelação, inversões de estruturas cristalinas) ou reações de desidratação, de dissociação, de decomposição, de óxido-redução, etc. Em geral transições de fase, desidratações, reduções e certas reações de decomposição produzem efeitos endotérmicos, enquanto que cristalizações, oxidações, algumas reações de decomposição produzem efeitos exotérmicos.

A análise termogravimétrica permite um maior conhecimento da temperatura inicial e final para degradação térmica. Esta análise também pode ser utilizada para investigar a reatividade de materiais carbonosos. A temperatura de pico é identificada no perfil de queima, o ponto no qual a taxa de perda de massa devido à combustão é máxima (DEMIRBAS, 2004).

A figura 12 representa as curvas da temperatura real de uma amostra e da temperatura diferencial em função de T ou t ., para exemplificá-las graficamente. A origem dos picos endotérmico e exotérmico pode ser provocada por fenômenos físicos ou químicos. A figura abaixo ilustra a representação das curvas da temperatura real de uma amostra e da temperatura diferencial em função de T ou t .

FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE TEMPERATURA



FONTE: Ionashiro (2005).

Biagini e colaboradores (2002), no estudo da pirólise de lodo de esgoto, atribuíram as perdas de massa ocorridas a temperaturas inferiores a 600 °C à degradação térmica da matéria orgânica, e as perdas ocorridas acima de 600 °C à decomposição da matéria inorgânica.

Considera-se, de um modo geral, que diferentes regimes de temperatura correspondem diferentes etapas limitantes da reação. Em temperaturas baixas, a velocidade depende da reação química. Então sob condições adequadas de temperatura e concentração de oxigênio, os gases de combustão formados na zona primária contendo alto teor de CO₂ vão se equilibrando conforme entram em contato com combustível ainda não queimado. Como a reação de redução é endotérmica, acontecerá um resfriamento dos gases conforme a reação se procede (Ndiema et al., 1998).

Segundo IONASHIRO (2005) a lista de aplicações da análise térmica diferencial cresceu rapidamente, de modo que hoje se pode afirmar que constitui valiosa fonte de informações em todos os setores da química.

O quadro abaixo relaciona os possíveis fenômenos com a variação da entalpia.

QUADRO 3 – VARIAÇÃO DA ENTALPIA NA ATD

Fenômeno	Variação de Entalpia	
	Endotérmico	Exotérmico
Físico		
Transição Cristalina	+	+
Fusão	+	-
Vaporização	+	-
Sublimação	+	-
Adsorção	-	+
Desadsorção	+	-
Absorção	+	-
Químico		
Desolvatação	+	-
Desidratação	+	-
Degradação Oxidativa	-	+
Oxidação em Atmosfera gasosa	-	+
Redução em atmosfera gasosa	+	-
Reações e Óxido redução	+	+
Reações no estado sólido	+	+

FONTE: Ionashiro (2005).

2.6 CLASSIFICAÇÃO RESÍDUO CONFORME ABNT NBR 10.004

A norma ABNT NBR 10.004:2004 possui como objetivo a classificação e os códigos dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, visando o correto gerenciamento dos mesmos. Os resíduos sólidos são classificados em dois grupos - perigosos e não perigosos, sendo ainda este último grupo subdividido em não inerte e inerte.

A respectiva norma define como principais referências normativas as normas:

- a) ABNT NBR 10005:2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos;
- b) ABNT NBR 10006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos;
- c) ABNT NBR 10007:2004 – Amostragem de resíduos sólidos;
- d) USEPA - SW 8461–Métodos de ensaio para avaliação de resíduos sólidos - Métodos físico-químicos.

Para os efeitos da Norma NBR 10004, os resíduos são classificados em:

a) Resíduos Classe I – Perigosos: Podem apresentar riscos à saúde pública e ao meio ambiente por causa de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, através da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

b) Resíduos Classe II – Não perigosos: sendo que esta tipologia ainda pode ser subdividido em:

- Resíduos Classe II A – Não inertes; Incluem-se nesta classe os resíduos potencialmente biodegradáveis, combustíveis ou solúveis, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I.
- Resíduos Classe II B – Inertes: São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, não tem nenhum de seus

constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

2.7 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS PROVENIENTES DA QUEIMA DA BIOMASSA RESIDUAL

A Resolução SEMA 016/2014 (Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Paraná), define emissão atmosférica como o lançamento na atmosfera de qualquer forma de matéria sólida, líquida ou gasosa, ou de energia, efetuado por uma fonte potencialmente poluidora do ar.

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados como primários ou secundários de acordo com o momento em que se formam. Sendo considerados poluentes primários os poluentes gerados inicialmente e lançados na atmosfera, proporcionando condições para outras reações (secundárias), capazes de afetar a estrutura dos componentes gasosos atmosféricos. Os principais poluentes são: material particulado, SO_x , NO_x , CO, CO_2 , VOC's e O_3 . Já os poluentes secundários são formados através da reação dos poluentes primários com gases ou água presentes na atmosfera, essa última sob a forma de vapor ou líquido, através das chuvas. Os principais são: H_2SO_4 , HNO_3 , HCl e O_3 (FRANCISCO, 2012).

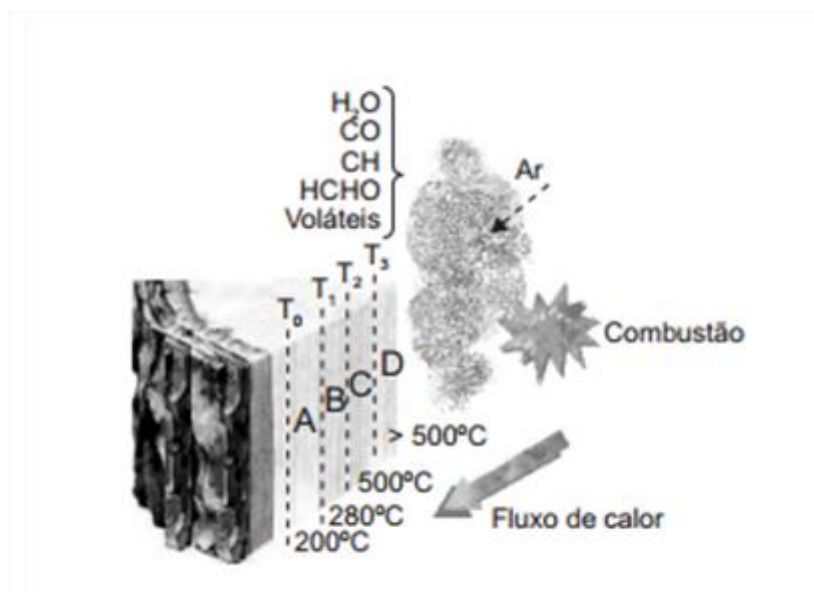
Os poluentes atmosféricos podem se apresentar no estado sólido, líquido e/ou gasoso. Substâncias sólidas ou líquidas podem ser agrupadas como material particulado.

As emissões poluentes originadas do processo de combustão da biomassa estão fortemente relacionadas às suas propriedades e benefícios ambientais significativos podem ser obtidos da combustão direta de biomassa, pirólise ou gaseificação. A eficiência do processo de combustão pode ser avaliada, ainda, pela composição das cinzas. Elevados teores de carbono não queimado nas cinzas indica não apenas baixa eficiência na queima do combustível, como também reduz a estabilização das cinzas (têmpera química) e aumenta o volume de cinzas (VIRMOND, 2007).

Segundo Pinto (2005), durante a combustão da madeira de eucalipto, além da formação de monóxido de carbono, metano, metanol, formaldeído, ácido fórmico e acético e hidrogênio, são também liberados alcatrões altamente inflamáveis,

conduzidos para fora do corpo sólido pelos gases e vapores, formando uma suspensão de gotículas chamada fumaça. Quando a temperatura da superfície atinge aproximadamente 1000 °C, o carbono é rapidamente consumido na superfície e as regiões de degradação penetram na madeira. As chamas desaparecem dando lugar à queima luminosa do monóxido de carbono e hidrogênio.

FIGURA 13 – REAÇÕES DE COMBUSTÃO ACIMA DE 500 °C



FONTE: Pinto (2005).

A figura acima demonstra as fases de reações de combustão da madeira em diferentes temperaturas e quais gases são normalmente gerados.

Os principais agentes da poluição atmosférica em gases de combustão são o material particulado (MP), o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO₂), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os óxidos de enxofre (SO_x) (CARVALHO e LACAVA, 2003).

O material particulado (MP) é uma mistura de partículas líquidas e sólidas em suspensão no ar, com composição e tamanho dependentes das fontes de emissão (BORGES, 2015).

O monóxido de carbono (CO) é gerado na combustão incompleta de combustíveis fósseis, sendo que o mesmo é um gás incolor, inodoro, e insípido, gerado pela combustão incompleta. Em altas concentrações, afeta os reflexos

humanos. Após sofrer oxidação completa gera o dióxido de carbono (CO_2), causador do aumento do efeito estufa.

O termo NO_x representa a combinação de monóxido e dióxido de nitrogênio (NO e NO_2). Os óxidos de enxofre são produzidos pela queima de combustíveis que tenham enxofre em sua composição, ou por produção de ácido sulfúrico. O carvão e os óleos residuais possuem altos níveis de nitrogênio ligado ao combustível, que formam os NO_x . A formação dos NO_x depende da temperatura de queima, da vazão entre ar e combustível e da umidade (LUCON, 2003).

A combustão ou incineração de resíduos sólidos emite gases tóxicos, alguns corrosivos, como SO_2 , NO_x , CO e compostos orgânicos voláteis (VOC's) podemos destacar os hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (PAH's), cuja formação está relacionada à presença de fuligem durante a combustão, podendo causar problemas respiratórios. As emissões de poluentes geradas durante a combustão estão relacionadas com a composição do combustível (BATISTELLA, 2015).

O cloro presente no lodo pode formar cloreto de hidrogênio (HCl), cloro gasoso (Cl_2), cloretos de metais alcalinos. As emissões de material particulado, CO e poluentes orgânicos incluindo, compostos orgânicos voláteis (COVs) e PAHs, são causados pela combustão incompleta de biomassa (RAVINDRA, SOKHI e GRIEKEN, 2008). Se o resíduo possui cloro em sua composição, o mesmo pode resultar na formação de HCl , dioxinas e furanos, e outras espécies organocloradas. Os vapores ácidos provocam corrosão nas caldeiras, e as dioxinas e furanos são extremamente tóxicas, mutagênicas e afetam o sistema imunológico (CHAGGER, 1998).

Nos frigoríficos, em geral, os poluentes atmosféricos são gerados pela queima de combustíveis nas caldeiras que produzem vapor para os processos produtivos, seja para os processos principais ou para as graxarias, caso estejam anexas aos frigoríficos. Neste caso, óxidos de enxofre e de nitrogênio e material particulado são os principais poluentes a considerar (PACHECO, 2006).

Para verificação do atendimento aos limites legais, devem ser realizadas campanhas de amostragem isocinética nas chaminés, as quais irão indicar ou não a necessidade da instalação de dispositivos de controle ambiental. Os sistemas mais utilizados para controle ambiental nas chaminés das unidades de geração de vapor são os coletores de pó centrífugos tipo multiciclones e os sistemas via úmida de lavagem de gases (FEAM, 2014).

Dentre as principais normas técnicas específicas a respeito da realização do controle e monitoramento de emissões atmosféricas no Brasil, pode-se citar:

- Resolução CONAMA nº 316/2002, dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, onde considera-se tratamento térmico todo e qualquer processo cuja operação seja realizada acima da temperatura mínima de oitocentos graus Celsius. Esta resolução considera como resíduos os materiais ou substâncias, que sejam inservíveis ou não passíveis de aproveitamento econômico, resultantes de atividades de origem industrial, urbana, serviços de saúde, agrícola e comercial.
- Resolução CONAMA nº 436/2011, estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, onde os limites são fixados por poluente e por tipologia de fonte.
- Resolução SEMA nº 042/2008, estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras e dá outras providências. Esta norma define quais resíduos/compostos são proibidos de serem utilizados em queima em caldeiras.
- Resolução SEMA nº 016/2014, define critérios para o Controle da Qualidade do ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade de vida.

Considera-se ainda no Capítulo II da Resolução SEMA 016/2014, refere-se aos Padrões de Emissão, que são os limites máximos de emissão permissíveis de serem lançados na atmosfera por fontes estacionárias potencialmente poluidoras. Sendo que os padrões de emissão para fontes estacionárias estão fixados por poluente ou por tipologia de fonte potencial de poluição do ar. Este capítulo também define critérios para o monitoramento das emissões no estado do Paraná.

Considera-se no item IV, ainda do Capítulo II, sobre o padrão de emissão para a geração de calor ou energia utilizando derivados de madeira como combustível. Desta forma, a condição referencial de oxigênio para fontes de combustão externa para caldeiras e demais casos, assume o valor de 11%.

Os padrões para fontes novas de combustão externa estabelecidos nesta normativa são demonstrados conforme o quadro abaixo:

QUADRO 4 – PADRÕES PARA FONTES EXISTENTES DE COMBUSTÃO EXTERNA UTILIZANDO COMO COMBUSTÍVEL DERIVADOS DE MADEIRA

Potência Térmica Nominal MW	Densidade colorimétrica	MP-total	CO ⁴⁾	NO _x	SO _x	Automonitoramento – Amostragem	
		mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	Parâmetros	Frequência
Até 0,05	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann ²⁾	560 ¹⁾	5.000 ¹⁾	NA	NA	CO ou MP-total, O ₂	Anual
Entre 0,05 e 0,15		560 ¹⁾	2.500 ¹⁾	NA	NA		Anual
Entre 0,15 e 1,0		560 ¹⁾	1.300 ¹⁾	NA	NA		Anual
Entre 1,0 e 10		560 ¹⁾	1.000 ¹⁾	NA	NA		Semestral
Entre 10 e 30		400	2.000 ³⁾ 1.000 ³⁾	500	NA	MP-total, CO, NO _x e O ₂	Semestral
Entre 30 e 50		200	2.000 ³⁾ 1.000 ³⁾	500	NA		Semestral
Entre 50 e 70		200	1.000	500	NA		Semestral
Entre 70 e 100		100	1.000	500	NA		Semestral
Acima de 100		100	500	500	NA		Contínuo

Notas: 1) Na faixa até 10 MW, o controle das emissões poderá ser comprovado através do atendimento ao padrão de MP-total ou atendimento ao padrão de CO a critério do órgão ambiental licenciador;

2) exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramonagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia;

3) válido a partir de 26/12/2016;

4) padrões de CO aplicáveis para operação de plena carga;

5) válido até 25/12/2016.

NA: Não aplicável

FONTE: Resolução SEMA 016/2014 (2014).

Ainda sobre esta resolução, que trata sobre a geração de calor ou energia utilizando mais de um tipo de combustível, deve-se obedecer as seguintes instruções:

- Os padrões de emissão são calculados somando os padrões dos diferentes combustíveis usados na proporção da respectiva energia fornecida;
- Se um padrão de emissão para um dos combustíveis não está definido nesta Resolução, deve ser atendido o padrão do outro combustível sem alteração;
- Para o caso de mistura de combustíveis com substâncias a serem incineradas, os padrões de emissão devem ser calculados a partir de uma média, em função da respectiva energia fornecida para a geração de calor ou energia e para a incineração, quando possível, adotando os padrões deste artigo e do Art. 31 (este artigo trata dos padrões de lançamento para incineração).
- Os padrões para os combustíveis individuais devem corresponder com a faixa da potência térmica nominal instalada;

e) Os critérios do automonitoramento devem corresponder com a faixa da potência térmica nominal instalada.

Realizando uma comparação de normas mundiais relacionadas as emissões atmosféricas, pode-se citar nos Estados Unidos a norma que faz parte da Lei do Ar Limpo (Clean Air Act), publicada inicialmente em 1990. A Environmental Protection Agency (EPA) estabeleceu padrões nacionais de qualidade atmosférica para seis poluentes principais, que são chamados "critérios" poluentes atmosféricos. Periodicamente, as normas são revisadas. A EPA-40 CRF Parte 50, trata das Normas Nacionais de Qualidade do Ar, estabelecendo limites de emissão de poluentes em sistemas de combustão em fontes fixas. Na União Europeia a Diretiva (UE) 2015/2193 do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, publicada em 25 de novembro de 2015, estabelece as regras de controle das emissões para a atmosfera de dióxido de enxofre (SO_2), de óxidos de nitrogênio (NO_x) e de poeiras provenientes de médias instalações de combustão, reduzindo as emissões para a atmosfera e os seus potenciais riscos para a saúde humana e o ambiente. Estabelece igualmente regras de monitoramento das emissões de monóxido de carbono (CO). Esses limites de emissão estão descritos conforme tabela abaixo.

TABELA 2 – COMPARAÇÃO DE NORMAS REFERENTES A EMISSÕES ATMOSFÉRICAS E QUALIDADE DO AR

NORMA	CONAMA 436/2011	SEMA 16/2014*	EPA-40 CFR parte 50	Directiva (UE) 2015/2193
Objetivo Norma	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007	Dispõe sobre a especificação dos Padrões de Emissão, que são os limites máximos de emissão permissíveis de serem lançados na atmosfera por fontes estacionárias potencialmente poluidoras. Aplicável no estado do Paraná.	O Clean Air Act , exige EPA para definir padrões nacionais de qualidade do ar (40 CFR parte 50) para os poluentes considerados nocivos para a saúde pública e para o ambiente. Periodicamente, as normas são revisadas.	Relativa às instalações de combustão média (MCP), com uma potência térmica nominal igual ou superior a 1 megawatt (MWth) e inferior a 50 MWth. Esta normativa possui metas progressivas para os anos de 2020 e 2030.
Correção Oxigênio (O₂)	8%	11 %	NA	NA
Monóxido de Carbono (CO)	3250 mg/Nm ³	2500 mg/Nm ³	35*ppm	NA
Óxidos de nitrogênio (NO_x)	650* mg/Nm ³	NA	100** ppb	650 mg/Nm ³
Óxidos de enxofre (SO₂)	280 mg/Nm ³	NA	75 ppb	200 mg/Nm ³
Material Particulado (MP)	520 mg/Nm ³	560 mg/Nm ³	150 *** g/m ³	30 * mg/Nm ³
Observação	Para caldeiras que utilizam derivados de madeira como combustível com potência térmica nominal (MW) entre 2 e 10. *expresso em NO ₂ . Entre 10 e 50 (MW)	Para caldeiras que utilizam derivados de madeira como combustível com potência térmica nominal (MW) entre 2 e 10	* período de 1 hora. Valor máximo não deve exceder mais de uma vez em um ano. ** expresso em NO ₂ no período de 1 hora diária máxima. ***período de 24 horas	Valores considerando como combustível biomassa sólida. * 50 mg/Nm ³ no caso de instalações com uma potência térmica nominal superior a 5 MW e inferior e igual a 20 MW

Fonte: Autora (2017).

2.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) COM ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA DE RAIOS X (EDS)

O MEV é um aparelho que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida. Possui como uma importante característica a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo (DEDAVID et al., 2007).

No ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura, um feixe de elétrons é incidido numa pequena região da amostra. Quando isso acontece são gerados sinais diferentes, tais como elétrons secundários, elétrons retroespalhados, dentre outros. Esses sinais são detectados e transformados em sinais elétricos que vão permitir a formação da imagem da superfície, composição de fases e análise composicional (SAMPAIO, 2013).

O EDS (energy dispersive x-ray detector) é um acessório essencial no estudo de caracterização microscópica de materiais. Quando o feixe de elétrons incide sobre um mineral, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios X. Um detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que mineral está sendo observado. O diâmetro reduzido do feixe permite a determinação da composição mineral em amostras de tamanhos muito reduzidos ($< 5 \mu\text{m}$), permitindo uma análise quase que pontual.

A zona analisada será, portanto, aquela que é percorrida pelo feixe, podendo utilizar o modo de varredura onde a análise será de toda a superfície da imagem, ou também é possível parar a varredura e analisar em um ponto (spot), área ou linha selecionada na imagem.

O detector é capaz de determinar a energia dos fótons que ele recebe, onde é possível traçar um histograma com a abscissa, sendo a energia dos fótons (keV) e a ordenada o número de fótons recebidos (contagens), gerando um espectro. A interpretação dos espectros é facilitada por uma base de dados que contém, para

cada elemento, as energias e a intensidade das raias que as produziu (DEDAVID et al., 2007).

A análise por EDS permite obter a composição de um material em termos qualitativos, quantitativos e semiquantitativos. Estes resultados são originados da comparação da intensidade das riscas espectrais, características do material com os espectros de referências, previamente computados em bancos de dados (SAMPAIO, 2013).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL DE COLETAS DE LODO E SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTE IMPLANTADO

Os resíduos em estudo foram coletados em dois abatedouros de aves localizados na região oeste do estado do Paraná.

O material caracterizado como lodo I, utiliza como coagulante o cloreto férrico. Este abatedouro possui capacidade de abater 420.000 aves/dia, com um consumo de água de aproximadamente 21,5 litros por ave abatida. A flotação deste efluente gera cerca de 15 m³/hora de lodo flotado, que após aquecimento e processamento nos tridecanterers gera em torno de: 13 m³/hora de clarificado, 1.300 kg/h de lodo desidratado (60% umidade), e 250 kg/h de óleo ácido (38% de acidez). Gerando como resíduo da estação de tratamento de efluentes, aproximadamente 30 (trinta) toneladas de lodo a 65% de umidade por dia, que atualmente são encaminhados para um processo de compostagem juntamente com outros resíduos orgânicos. Este processo de destinação possui um custo atual de aproximadamente R\$ 87,00/ tonelada.

O lodo II utiliza como coagulante um coagulante orgânico (poliDADMAC), e este abatedouro possui capacidade de abater 340.000 aves/dia, utilizando um consumo de água médio de 22 litros de água por ave abatida. A flotação deste efluente gera cerca de 12 m³/hora de lodo flotado, que após aquecimento e processamento nos tridecanterers gera em torno de: 9 m³/hora de clarificado, 2 m³ de lodo desidratado (60% umidade), e 340 kg/h de óleo flotado com acidez de aproximadamente 6%. Atualmente este lodo desidratado passa por um cozimento em digestor, juntamente com produtos não comestíveis (vísceras) onde é transformado em farinha com um teor de umidade final de 3%, posteriormente utilizado junto com demais compostos para ração animal. Portanto, neste cenário o custo do coagulante fica em torno 40% maior, comparado aos coagulantes inorgânicos, porém a destinação ocorre dentro da própria fábrica.

A Tabela 3 demonstra resumidamente os dados obtidos dos locais de coleta, considerando dados médios do ano de 2015.

TABELA 3 – DADOS DOS LOCAIS DE COLETA DE LODO

	Abatedouro I	Abatedouro II
Aves abatidas / dia	420.000	340.000
Consumo de água / ave	21,5 litros /ave	22 litros / ave
Geração de Lodo Flotado	15 m ³ / hora	9 m ³ / hora
Geração de Lodo Desidratado	1.300 kg/h	800 kg/h
Geração de Óleo Flotado	250 kg/h	340kg/h
Destinação Final Lodo desidratado	Compostagem	Cozimento junto com processo de vísceras

FONTE: A autora (2016).

Conforme o monitoramento do efluente gerado nos processos da indústria, segue abaixo uma descrição das características físico-químicas do efluente bruto, sendo apresentados os valores médios encontrados no ano de 2015.

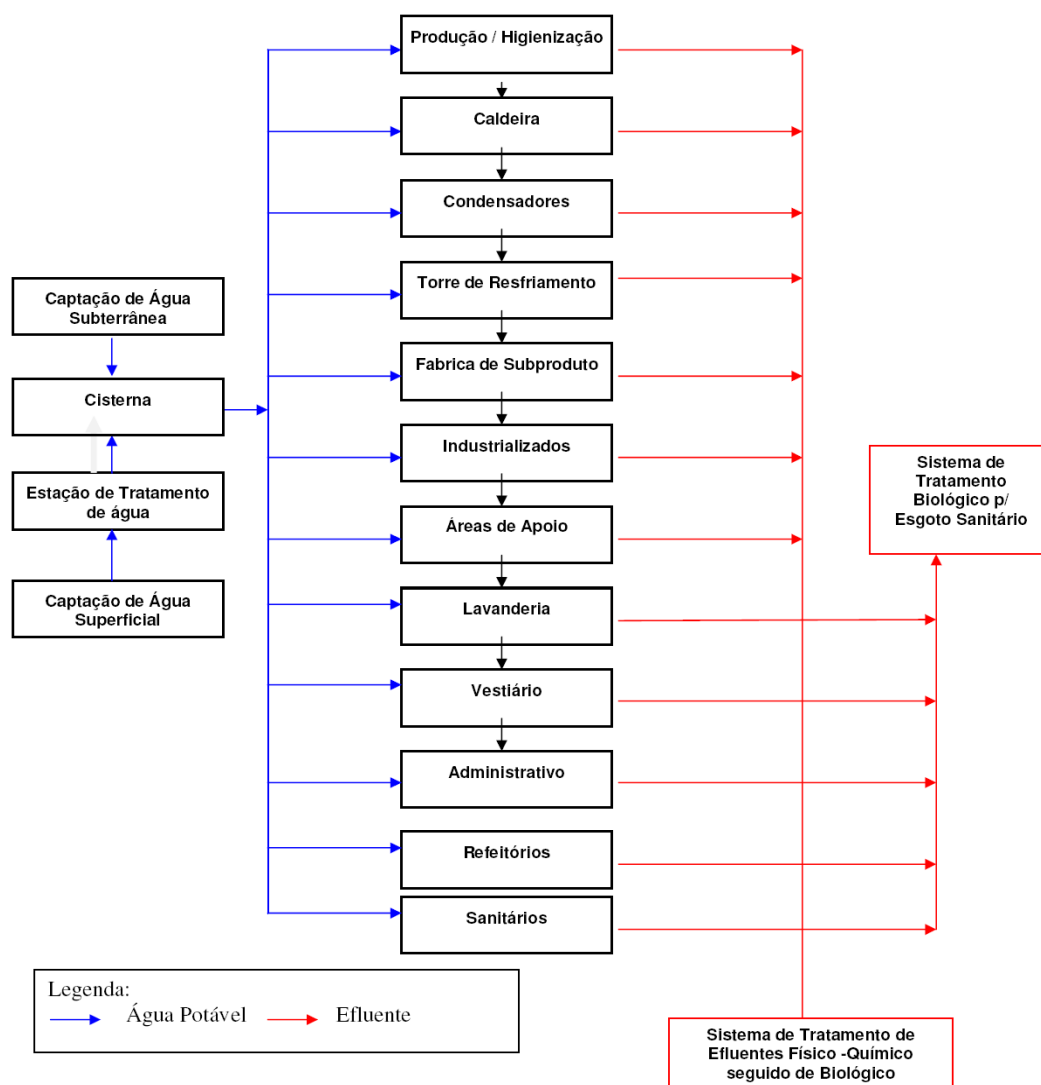
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE BRUTO

Parâmetros	Abatedouro I	Abatedouro II
DBO	1.800 mg/L	4.000 mg/L
DQO	4.000 mg/L	7.000 mg/L
pH	6,2	6,8
Óleos e Graxas	600 mg/L	2.000 mg/L
Sólidos Totais	3.000 mg/L	2.000 mg/L

FONTE: A autora (2016).

Para um melhor entendimento, segue abaixo uma descrição do ciclo da água, citando as possíveis fontes de captação utilizada pelos abatedouros, os principais locais de uso de água na indústria, assim como demonstrando os locais geradores de efluentes líquidos, e os possíveis sistemas de tratamento de efluentes utilizados.

FIGURA 14 – FLUXOGRAMA DOS LOCAIS GERADORES DE EFLUENTES LÍQUIDOS

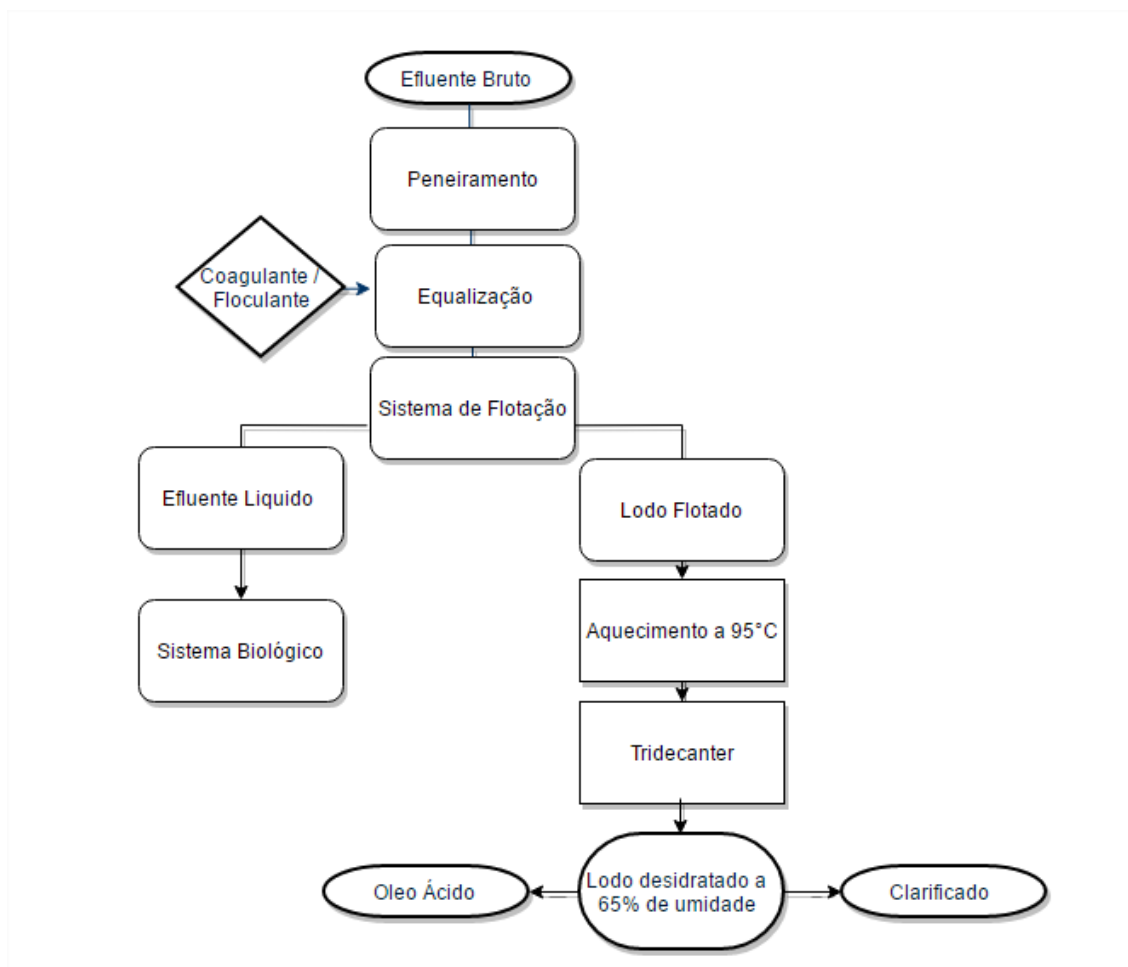


FONTE: A autora (2016).

O monitoramento do efluente bruto é realizado por meio de coletas realizadas na saída do tanque de equalização, antes de entrar no sistema de flotação físico-química.

A Figura 15 ilustra o fluxograma que representa as etapas do sistema de tratamento de efluentes e processamento do lodo de ambos os abatedouros analisados.

FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS E PROCESSAMENTO DO LODO GERADO



FONTE: A autora (2016).

Os abatedouros em estudo possuem dois sistemas de peneiramento, sendo que a primeira etapa possui o objetivo de separação entre os subprodutos (principalmente vísceras) e o efluente gerado na planta. Posteriormente o efluente passa por um sistema de peneiramento com malha mais fina (0,5 a 0,75 mm) que é responsável pela remoção de sólidos presentes no efluente. Esta remoção de sólidos antes do processo físico químico garante uma menor carga orgânica no sistema e consequentemente reduz o uso de produtos químicos, assim como melhora a eficiência do processo posterior.

Após passar pelo peneiramento o efluente segue para o tanque de equalização com a finalidade de melhor homogeneização do efluente, para ocorrer o bombeamento de uma vazão constante para os flotadores. Antes de entrar nos flotadores o efluente bruto recebe a adição do coagulante e do floculante.

O abatedouro I utiliza como coagulante o produto Cloreto Férrico, e como floculante o polímero aniônico (Zetag 4120).

O abatedouro II, devido a utilização do coagulante orgânico (Magnafloc LT 7995), faz-se necessário a dosagem de 2 polímeros sendo um aniônico (Zetag 4120) e outro catiônico (Zetag 8185) para obter uma melhor coagulação.

Ao entrar no flotador o efluente recebe uma injeção de microbolhas de ar, este processo é responsável por facilitar a suspensão do lodo formado, desta forma otimizando a eficiência do sistema.

A Figura 16 ilustra os flotadores implantados no sistema de tratamento de efluentes líquidos do Abatedouro I.

FIGURA 16 – PROCESSO DE FLOTAÇÃO INSTALADO NO ABATEDOURO I



FONTE: A autora (2016).

Para facilitar a destinação, o lodo formado no processo de flotação físico-química, é enviado para um sistema de processamento, onde o mesmo deve ser aquecido a uma temperatura média de 95 °C, por um período mínimo de 30 minutos, e ser bombeado para um equipamento denominado tridecanter, onde será centrifugado a uma velocidade de aproximadamente 2800 rpm, onde irá ocorrer a separação em três fases: Óleo ácido (gordura), Clarificado (água residual) e Lodo

desidratado. Sendo que este último apresenta umidade em torno de 65% (base úmida).

Na Figura 17 pode-se visualizar o equipamento tridecanter e os subprodutos gerados após o processamento.

FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO DO TRIDECANTER E OS RESPECTIVOS PRODUTOS GERADOS



FONTE: A autora (2016).

Conforme já comentado anteriormente, o lodo desidratado do Abatedouro I, é coletado na indústria por uma empresa terceirizada, que realiza o processo de compostagem juntamente com outros materiais orgânicos, gerando um adubo orgânico. Este processo de coleta e tratamento possui um custo por tonelada de lodo coletado. O óleo gerado neste abatedouro é comercializado para queima em caldeira.

O lodo desidratado do Abatedouro II é enviado para cozimento em digestor, juntamente com produtos não comestíveis (vísceras) e é transformado em farinha, onde posteriormente é utilizado junto com os demais compostos para ração animal. O óleo gerado possui uma acidez em torno de 6% e pode ser utilizado em ração animal.

3.1.1 Coleta das Amostras

Para a realização do estudo, foram realizadas as coletas de amostras do Lodo desidratado, provenientes do sistema de tratamento de efluentes do Abatedouro I e do Abatedouro II, no dia 10/03/2016.

Realizou-se a coleta de aproximadamente 4 kg de lodo desidratado, após passar pelo sistema de processamento e desidratação, sendo que as amostras foram denominadas Lodo I (coletado no Abatedouro I) e Lodo II (coletado no Abatedouro II).

Foi coletado também nesta data, amostras do cavaco utilizado na caldeira para a geração de vapor do Abatedouro I.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.2.1 Caracterização das amostras *In Natura*

Para a realização de uma caracterização físico-química, parte do material coletado foi separado aproximadamente 2 kg de cada amostra foi acondicionado em uma caixa de isopor e enviado para um laboratório certificado NBR ISO/IEC 17.025.

Foi solicitado para laboratório credenciado, a análise para classificação dos resíduos conforme a norma ABNT NBR 10004:2004 (massa Bruta), NBR 10005 - Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos e Orgânicos, e NBR 10006 - Extrato Solubilizado - Parâmetros Inorgânicos. As demais análises solicitadas são apresentadas na Tabela 5.

TABELA 5 – PLANEJAMENTO DAS ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO

Parâmetro	Lodo I (Cloreto Férrico)	Lodo II (Coagulante Orgânico)
Arsênio	X	X
Cádmio	X	X
Cobalto	X	X
Chumbo	X	X
Enxofre	X	X
Mercúrio	X	X
Níquel	X	X
Selênio	X	X
Telúrio	X	X
Tálio	X	X
Poder calorífico inferior	X	X
Análise Imediata	X	X
Análise elementar	X	X

FONTE: A autora (2016).

Para todos os metais, foram realizadas a preparação e abertura da amostra separadamente, conforme Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 2012. A outra parte das amostras foi congelada para realizar a preparação das amostras de lodo com cavaco em suas devidas proporções.

3.2.2 Preparo das amostras de Cavaco

O cavaco coletado no abatedouro I, apresentava granulometria diversificada. O mesmo é proveniente de eucalipto plantado na região oeste do Paraná.

Com o objetivo de caracterizar o cavaco utilizado, foram coletadas 10 amostras em dias diferenciados, no período de 13/09 a 25/10/2016, para realizar uma caracterização da análise imediata e do poder calorífico superior e inferior do mesmo. A Figura 18 demonstra uma das amostras de cavaco que foi coletada no abatedouro I.

FIGURA 18 – AMOSTRA DE CAVACO COLETADO NO ABATEDOURO I



FONTE: A autora (2016).

Para diminuir a granulometria do cavaco o mesmo foi submetido a uma moagem em equipamento Picador Forageiro TRF 400 da marca TRAPP. Devido as características do material, primeiramente utilizou-se uma peneira malha 12 mm, e posteriormente uma peneira 5 mm, conforme ilustrado na Figura 19.

FIGURA 19 – TRITURADOR DE CAVACO E GRANULOMETRIAS DESEJADAS



FONTE: A autora (2016).

Após, o cavaco foi seco em estufa a 55 °C por um período de 24 horas.

3.2.3 Preparo das amostras de Lodo

As amostras de Lodo I (cloreto férrico) e Lodo II (coagulante orgânico), foram descongeladas e secas em estufa a 55 °C por um período de 48 horas. A figura 20 ilustra o lodo após secagem.

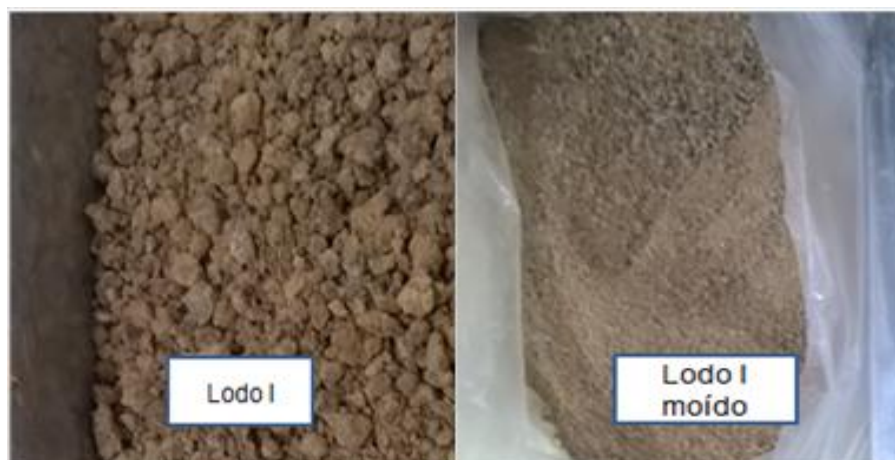
FIGURA 20 – LODO APÓS SECAGEM EM ESTUFA



FONTE: A autora (2016).

Posteriormente as amostras foram moídas em moedor manual, para ficarem com granulometria uniforme. Cabe ressaltar que a amostra de Lodo I estava mais desuniforme, e por este motivo esta amostra foi moída duas vezes. A Figura 21 demonstra a amostra antes e após a moagem.

FIGURA 21 – LODO I ANTES E APÓS MOAGEM



FONTE: A autora (2016).

A imagem da esquerda ilustra a amostra de lodo I, e a imagem da direita a amostra após passar duas vezes pelo moedor.

Após, foram preparadas as amostras com as proporções previamente planejadas. Cabe ressaltar que a proporção entre cavaco e lodo, foi planejada de forma a utilizar o volume de lodo gerado e garantir uma constante operação do processo de combustão.

A proposta foi avaliar as % de mistura do lodo, juntamente com o cavaco, e avaliar os parâmetros deste combustível para queima em caldeira. As proporções das misturas planejadas neste trabalho encontram-se indicadas na Tabela 6.

TABELA 6 – COMPOSIÇÃO MÁSSICA DAS AMOSTRAS DE LODO E CAVACO

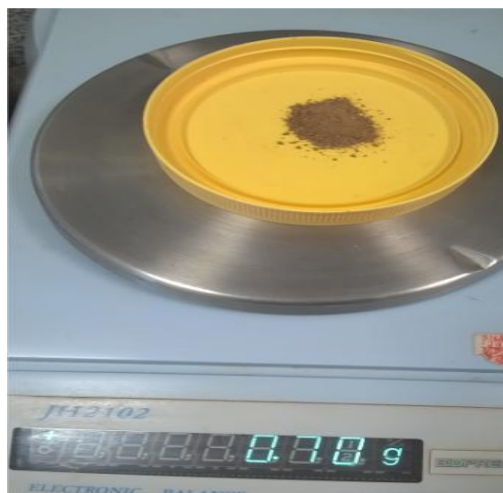
Amostras	Cavaco	% LODO I	% LODO II
A	90%	10%	0%
B	80%	20%	0%
C	70%	30%	0%
D	90%	0%	10%
E	80%	0%	20%
F	70 %	0%	30%
G	100%	0%	0%
H	0%	100%	0%
I	0%	0%	100%

FONTE: A autora (2016).

Os materiais foram pesados em balança analítica, e após foram acondicionados em saco plástico com suas devidas proporções, onde posteriormente pode-se realizar a mistura de forma homogênea.

A pesagem foi realizada conforme ilustrado na Figura 22.

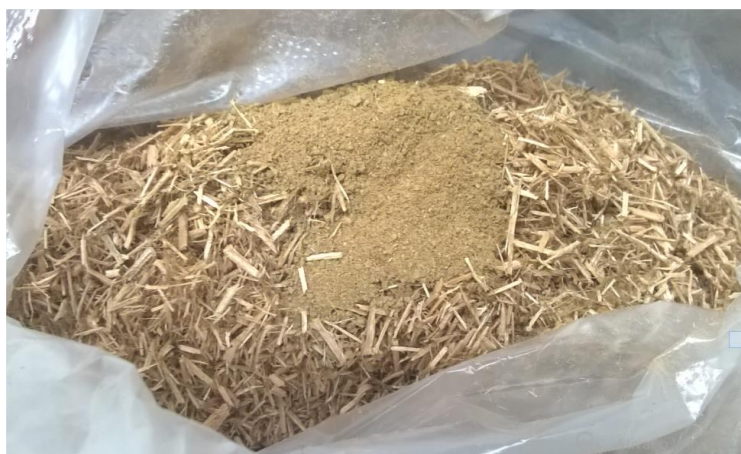
FIGURA 22 – PESAGEM DO LODO SECO E MOÍDO



FONTE: A autora (2016).

Foram preparadas amostras com 5 gramas de peso total para as análises de poder calorífico. Para a análise térmica diferencial (ATD) foram preparadas amostras de 3 gramas. Todas as amostras foram preparadas considerando a fração de lodos (lodo I e lodo II) adicionados ao cavaco, conforme planejamento experimental demonstrado na tabela 06. Na Figura 23 é possível visualizar uma das amostras da mistura de cavaco com o lodo.

FIGURA 23 – PREPARO DE AMOSTRA DE CAVACO COM LODO



FONTE: A autora (2016).

Foram realizadas as avaliações do potencial energético, analisando o Poder calorífico Superior (PCS) das nove amostras acima citadas.

3.2.4 Análise de poder calorífico Superior

As nove amostras anteriormente preparadas, foram enviadas para o Laboratório de Qualidade de Alimentos da UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus de Toledo/PR, para realização das análises do PCS.

Para realização das mesmas as amostras já moídas e secas, foram peneiradas em peneira ABNT 70, e prensadas na forma de pastilhas com aproximadamente 1g cada uma, e foram levadas em estufa a 105 °C até peso constante.

Após, a biomassa foi colocada em um cadinho de quartzo, o qual foi introduzido na bomba calorimétrica marca IKA, modelo C2000 basic. A metodologia para determinação do poder calorífico superior foi baseada no Manual de Instruções do Calorímetro e adaptado segundo a norma ABNT-NBR 8633, esta norma prescreve o método de determinação de poder calorífico superior a volume constante, em uma bomba calorimétrica adiabática, isotérmica ou estática.

Para cada biomassa a análise do PCS foi feita em duplicata, ou seja, foi determinado o PCS de duas amostras de cada biomassa e posteriormente calculada uma média entre os valores. O calorímetro tem como unidade de calor cal/kg.

3.2.5 Método para determinação de Poder calorífico Inferior (PCI)

O poder calorífico inferior (PCI) pode ser determinado, segundo Brito (1993), pela equação 8.

$$PCI = PCS - 600 \left(\frac{9H}{100} \right) \quad (8)$$

Onde:

PCS = é o poder calorífico superior determinado por meio de bomba calorimétrica (cal/g)

PCI = é o poder calorífico inferior (cal/g)

H = é o teor de hidrogênio (%)

3.2.6 Análise Térmica Diferencial

As nove amostras preparadas, foram enviadas para o laboratório CRC-Centro de Revestimento Cerâmico, localizado em São Carlos-SP.

O equipamento utilizado foi o Sistema de Informação modelo RB 3000 – 20, partindo da temperatura ambiente até 1100 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. Para a realização da análise foi necessário realizar a homogeneização da amostra e separar a quantidade a ser moída. Posteriormente em torno de 1g da amostra foi peneirada na malha de abertura 500 µm. A substância inerte usada foi uma alumina (Al_2O_3) de alta pureza (>99,0%).

3.2.7 Análise Elementar

A análise elementar consiste na avaliação da composição química elementar destas amostras: Carbono (C), Hidrogênio (H), Enxofre (S), Oxigênio (O), Nitrogênio (N) e cinzas.

Foi utilizada a norma ASTM D 5373-02 (07) “Standart Test methods for Instrumental Determination of carbon, hydrogen and nitrogen in “Laboratory samples of coal and coke” (CMQ-LCL-PE-017).

Para porcentagem de enxofre total foi utilizada a norma: ASTM D 4239-08 “Standart Test Methods for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High Temperature Tube Furnace Combustion method”, Método C (CMQ-LCL-PE-028). A norma ASTM D 3176-89 (02) “Standart for Ultimate Analysis of Coal and Coke” (CMQLCL- PE-072) foi utilizada para a determinação da porcentagem de oxigênio na amostra.

Os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) elementar das amostras foram obtidos em equipamento CHN Perkin-Elmer. Este método é baseado na oxidação completa da amostra (combustão) e análise dos gases liberados. A porcentagem de enxofre elementar (S) foi obtida por espectroscopia de emissão atômica com plasma induzido (ICP-AES) num equipamento Spectro Ciros CCD.

3.2.8 Análise Imediata

A composição Química imediata corresponde ao % de Carbono Fixo, materiais voláteis, cinzas e Umidade, de cada amostra.

3.2.8.1 Teor de Umidade

A medição do teor de umidade utilizada neste trabalho foi baseada em estufa de laboratório, consistindo em deixar a amostra úmida (m_u), por 24 horas a $103\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) em uma estufa de laboratório, com posterior determinação da sua massa seca (m_s).

A Equação 9 foi utilizada para a determinação do teor de umidade.

$$U(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100$$

(9)

Onde:

m_u = massa úmida da amostra, g

m_s = massa seca da amostra, g

$U(\%)$ = teor de umidade em base seca

3.2.8.2 Teor de materiais voláteis

O teor de materiais voláteis foi medido com o auxílio de uma mufla, previamente aquecida a $850 \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, na qual foi colocado um cadinho tampado de cada vez contendo a amostra de biomassa preparada e seca (m_s). Após aproximadamente 6 minutos, o cadinho ainda tampado foi retirado da mufla e colocado em um dessecador. Após 1 hora, aproximadamente, determinou-se a massa da amostra em balança analítica (m_f).

A Equação 10 foi utilizada para determinação do teor de voláteis.

$$MV(\%) = \frac{m_s - m_f}{m_i} \times 100$$

(10)

Onde:

m_s = massa seca da amostra, g

m_i = massa inicial da amostra, g

m_f = massa final da amostra, g

$MV(\%)$ = teor de materiais voláteis

3.2.8.3 Teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas também foi utilizada a mesma mufla descrita para a determinação do teor de materiais voláteis, aquecida até 750 °C, na qual foi colocada a amostra de biomassa preparada e seca (cadinho sem tampa) (m_s). Após um período de 6 horas retirou-se a amostra da mufla e esfriou-se em dessecador por 1 hora e pesou-se em balança analítica (m_r). A Equação 11 foi utilizada para o cálculo do teor de cinzas.

$$CZ(\%) = \frac{m_r}{m_s} \times 100$$

(11)

Onde:

m_r = massa do resíduo, g

m_s = massa seca da amostra, g

$CZ(\%)$ = teor de cinzas

3.2.8.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é uma medida indireta e pode ser calculado através da Equação 12:

$$CF(\%) = 100 - (MV + CZ)$$

(12)

Onde:

$CF(\%)$ = teor de carbono fixo

$MV(\%)$ = teor de materiais voláteis

$CZ(\%)$ = teor de cinzas

3.3 TESTE IN LOCO PARA ANÁLISE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Realizou-se no dia 01 de Fevereiro de 2017, nas dependências do Abatedouro I, um teste de combustão na caldeira, com o objetivo de avaliar o potencial energético da queima do lodo adicionado ao combustível principal (cavaco), e analisar as emissões atmosféricas geradas.

Para a realização do teste foi necessário a instalação de um inversor na rosca de alimentação do silo que realiza a dosagem do lodo na esteira de alimentação do cavaco na caldeira. A instalação deste inversor foi necessária para conseguir alterar a velocidade da rosca, para encontrar um % de dosagem adequado.

A caldeira utilizada para a queima foi da marca Biocham WSCV8000, número de serie 9706, ano de fabricação 1997, com potência térmica de 7,68 MW. A produção típica de vapor é de aproximadamente 8 ton./hora, com capacidade de geração de vapor de 10 ton./ hora. Esta caldeira utiliza como combustível principal o cavaco, com teor de umidade de 30 a 40% dependendo das condições climáticas, pois o pátio de armazenagem do cavaco não possui cobertura.

O consumo de cavaco anual é de aproximadamente 16.000 toneladas, com regime de operação de 24 horas/dia, com início na meia noite de segunda até sábado ao meio dia.

A caldeira utiliza um sistema com grelhas móveis, onde o cavaco picado é transportado por meio de correias transportadoras, dos silos até a caixa alimentadora, e através de roscas dosado dentro da caldeira.

Para fins de comparação, inicialmente realizou-se a análise do funcionamento da caldeira utilizando somente cavaco como combustível por um período de 4 horas. Devido as condições climáticas, o teor de umidade do cavaco no período do teste variou de 37 a 40%. O consumo médio de cavaco foi de 2.625kg por hora.

Posteriormente avaliou-se o funcionamento da caldeira utilizando como combustível o lodo proveniente do sistema de tratamento de efluentes, coletado da saída do tridecanter, com aproximadamente 65% de umidade, dosado juntamente com o combustível principal (cavaco) nas proporções de 10% em peso de lodo, também por um período de 4 horas. Foi utilizado cerca de 1.040 kg de lodo, aproximadamente 260 kg por hora.

A proporção de 10% de lodo foi definida devido à preocupação com as concentrações de emissões atmosféricas geradas. Para a realização da mistura, o lodo foi inserido em uma moega que realizava a dosagem na esteira de alimentação de cavaco. A figura 24 ilustra a mistura dos combustíveis.

FIGURA 24 – AMOSTRA DO COMBUSTÍVEL COMPOSTO POR CAVACO + 10% DE LODO



FONTE: A autora (2017).

Tanto o cavaco como lodo utilizado foi pesado na balança do respectivo abatedouro, sendo realizada a tara com o peso do veículo carregado e posteriormente com o peso do mesmo vazio. A diferença corresponde ao peso do material transportado.

Avaliou-se no período do teste, para ambos combustíveis a velocidade da rosca de alimentação de combustível, a pressão gerada na caldeira, o consumo de água e a produção de vapor.

Durante o período de teste na utilização de ambos combustíveis foi realizada a medição dos parâmetros de gases de combustão como: O_2 , CO , CO_2 , SO_x e NO_x , aferidos por um aparelho analisador de gases CHEMIST 400, número de série 2593, certificado de calibração 20612/16.

A amostragem dos gases foi realizada no orifício localizado no duto vertical de exaustão dos gases, após o filtro multiciclone. A amostragem do material particulado ocorreu na chaminé, após o motor de exaustão. A figura 25 demonstra a

localização dos pontos de coletas, assim como uma vista externa da chaminé durante a combustão do lodo adicionado ao cavaco.

FIGURA 25 – PONTOS DE COLETA DE GASES, MATERIAL PARTICULADO E VISTA EXTERNA DA CHAMINÉ DA CALDEIRA



FONTE: A autora (2017).

A caldeira onde os testes foram realizados não possui ajuste fino das vazões de ar primário e de ar secundário.

Além da análise das emissões atmosféricas geradas, também foi possível avaliar o rendimento da caldeira utilizando a mistura de lodo e cavaco como biomassa combustível.

Realizou-se no final de cada teste a coleta das cinzas geradas durante a combustão com o cavaco puro (amostra 3) e do lodo adicionado ao cavaco (amostra 2). Também foi coletada uma amostra das partículas retidas no filtro multiciclone após a queima do lodo juntamente com o cavaco (amostra 1). Conforme ilustra a figura 26.

FIGURA 26 – AMOSTRAS DE CINZAS APÓS COMBUSTÃO E PARTÍCULAS COLETADAS DO MULTICICLONE



FONTE: A autora (2017).

Estas amostras foram caracterizadas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por dispersão de energia de raios X (MEV/EDS).

3.3.1 Amostragem de Material Particulado

A amostragem de material particulado na fonte, para o caso da combustão (queima) da biomassa, consiste na coleta de uma amostra do volume de gás em movimento pelo duto ou chaminé do queimador de biomassa de forma a obter uma fração representativa do fluxo total.

A concentração dentro do instrumento utilizado para realizar a medida tem que ser necessariamente a mesma daquela no escoamento ($C_a = C_e$) do qual a amostra é extraída. A velocidade de amostragem deve ser idêntica à velocidade do escoamento ($V_a = V_e$), o que caracteriza uma amostragem isocinética (CARVALHO JUNIOR e LACAVA, 2003).

Na figura 27 se apresenta o equipamento utilizado para a análise de material particulado na chaminé da caldeira durante os testes.

FIGURA 27 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA AMOSTRAGEM DE MATERIAL PARTICULADO



FONTE: A autora (2017).

3.3.2 Amostragem dos gases de combustão

A amostragem e o acondicionamento dos gases a serem analisados podem ser realizados de forma contínua ou descontínua, através da extração de uma fração desses gases e direcionamento até o equipamento de análise, ou diretamente no local (chaminé do queimador de biomassa) em processo de medição contínua (ALMEIDA FILHO, 2008).

Para a medição dos gases de combustão foi adotado o analisador eletroquímico de gases para obtenção de dados on line, devidamente calibrado. A análise foi efetuada em intervalos regulares de 1 min, por um período mínimo de 15 minutos contínuos, sendo este um período representativo em condições típicas do processo. A figura 28 ilustra o equipamento para análises dos gases de combustão.

FIGURA 28 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA AMOSTRAGEM DE GASES



FONTE: A autora (2017).

3.3.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS)

Após os testes de combustão coletou-se amostras de cinzas provenientes da combustão do cavaco, lodo adicionado ao cavaco e e das partículas retidas no filtro multiciclone. A análise das amostras foi realizada em um MEV (figura 29), da marca TESCAN VEGA3.

As amostras foram preparadas de forma a ficarem espalhadas no porta amostra sobre uma fita de carbono dupla face, posteriormente foram metalizadas com uma fina camada (5 nm) de ouro na superfície ("sputtering"). As micrografias foram obtidas em diversos aumentos em módulo SE com detector de elétrons secundários. O equipamento EDS acoplado ao MEV foi o Penta FET Precision da OXFORD INSTRUMENTS.

Na Figura 29 se apresenta o equipamento utilizado para o preparo da amostra e para a realização das micrografias.

FIGURA 29 – EQUIPAMENTOS MEV/EDS



FONTE: A autora (2017).

3.3.4 Análises de Fisissorção N₂

Também foram enviadas amostras das cinzas para o laboratório LabCatProBio - Laboratório de Catálise e Produção de Biocombustíveis da Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, para realização de análises de fisissorção de N₂, onde foram previamente secas em estufas por 24 horas a 100 °C.

As isotermas de adsorção/dessorção foram registradas na temperatura do nitrogênio líquido utilizando o equipamento Nova 2000e da Quantachrome.

As amostras foram submetidas a um pré-tratamento a 150 °C por um período de 3 horas, sob vácuo para retirar toda umidade e espécies adsorvidas da superfície do material.

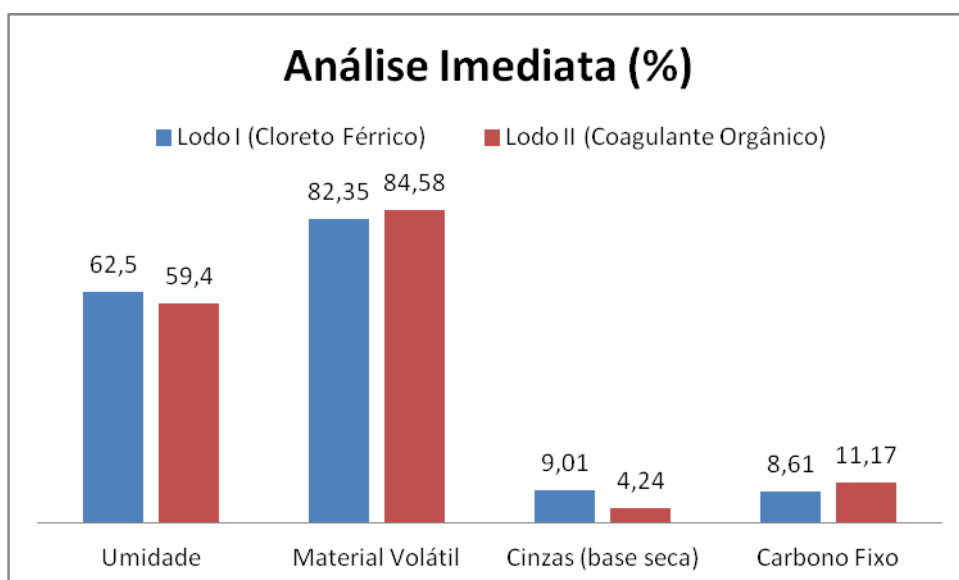
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS IN NATURA

4.1.1 Análise Imediata e Elementar Lodo I e Lodo II in natura

O Gráfico 1 representa os resultados obtidos para a análise imediata realizada com as amostras de lodo in natura coletadas nos abatedouros I e II, e identificadas como lodo I e lodo II, respectivamente.

GRÁFICO 1 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES IMEDIATAS DAS AMOSTRAS DE LODO IN NATURA



FONTE: A autora (2017).

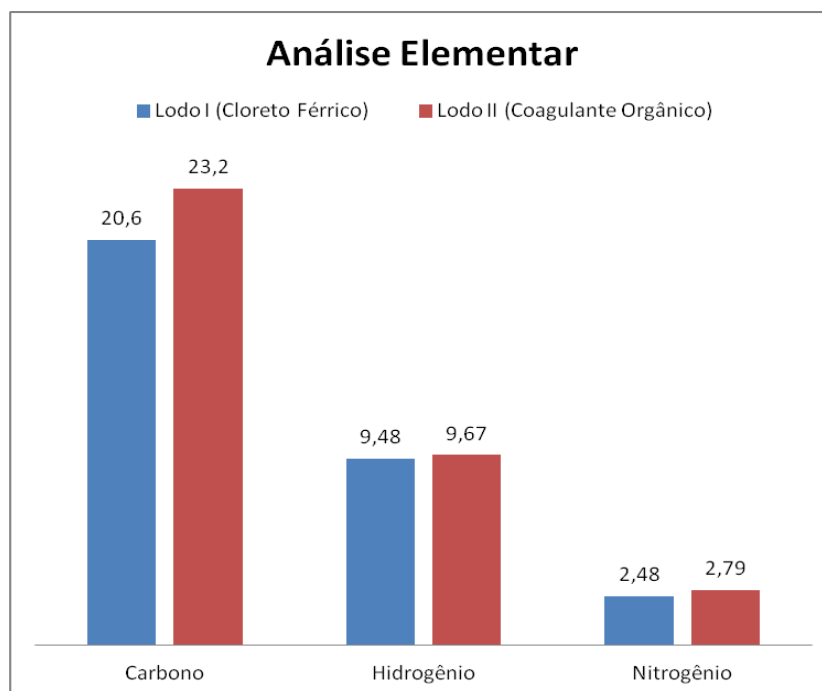
Conforme resultados obtidos no gráfico 1, o Lodo I apresentou 4,96% de umidade maior que o Lodo II. Este fato normalmente deve-se a ajustes de processo de desidratação realizado no tridecanter.

Porém, para os materiais voláteis, o Lodo II apresentou resultados superiores quando comparado com a amostra de Lodo I, e consequentemente apresentou um índice de cinzas 53% menor. Quanto maior o % de cinzas no combustível, maior será a quantidade de inertes e consequentemente haverá um aumento no volume da cinza que deverá ser destinado após a combustão.

O teor de carbono fixo encontrado no Lodo I foi 22,9% menor que o resultado do lodo II. Cabe ressaltar que níveis de carbono fixo levados demandam de um maior tempo de residência dentro da fornalha de combustão.

O Gráfico 2 representa os resultados obtidos para a análise elementar realizada com as amostras de lodo I e lodo II in natura.

GRÁFICO 2 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE ELEMENTAR DAS AMOSTRAS DE LODO IN NATURA



FONTE: A autora (2017).

Os resultados para os elementos carbono, hidrogênio e nitrogênio foram superiores nas amostras de Lodo II.

Realizando uma comparação dos resultados encontrados nas amostras de Lodo I e Lodo II com outros autores que já realizaram estudos com lodos da mesma atividade agroindustrial, os valores encontrados neste estudo para o elemento carbono foram inferiores a literatura, conforme pode ser visualizado na Tabela 7.

TABELA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE CARACTERIZAÇÃO DE LODOS GERADOS EM ABATEDOUROS DE AVES

Autores			Autora (2017)	Autora (2017)	VIRMOND (2007)	SENA (2005)
Biomassa: Lodo gerado no sistema de tratamento de efluentes de abatedouros de aves com posterior processamento em tridecanter			Lodo I (Cloreto Férrico)	Lodo II (Coagulante Organico)	N.I*	Lodo Cloreto Férrico
Análise Imediata	Umidade	%	62,5	59,4	15	70
	Material Volátil	%	82,35	84,58	74,8	80,8
	Cinzas (base seca)	%	9,01	4,24	12,3	5,74
	Carbono Fixo	%	8,61	11,17	8,4	13,46
Análise Elementar	Carbono	%	20,6	23,2	50,9	54,59
	Hidrogênio	%	9,48	9,67	7,9	7,6
	Nitrogênio	%	2,48	2,79	8,1	8,22

* Virmond (2007) não identificou o coagulante utilizado para a geração do lodo.

FONTE: A autora (2017).

A autora Virmond (2007) utilizou lodo seco em secador rotativo para posteriormente realizar a caracterização, desta forma utilizou-se material com apenas 15% de umidade. Este fato justifica a diferença na no teor de umidade das amostras.

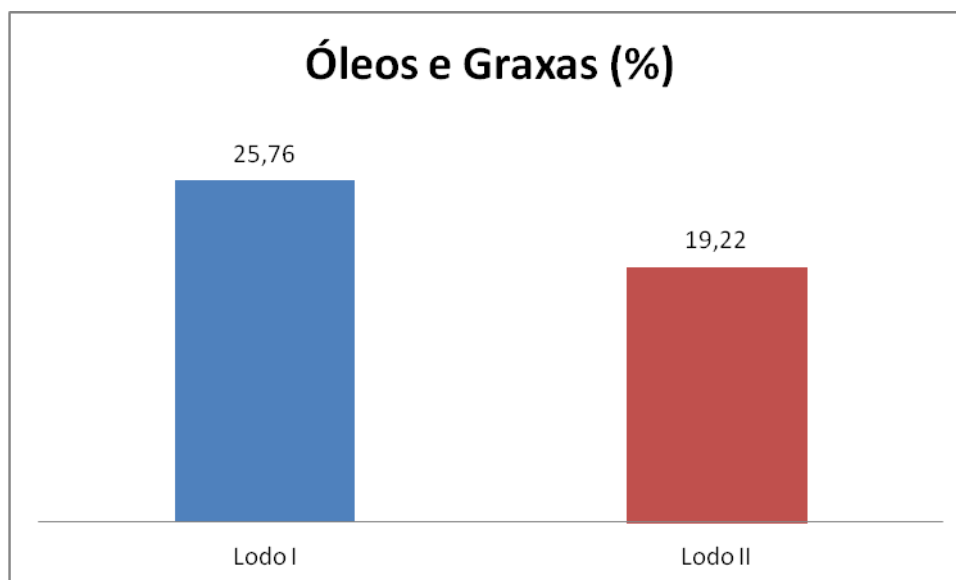
Conforme a tabela 7, ambas amostras de lodo em estudo também apresentaram valores inferiores para o elemento nitrogênio 2,48% (lodo I) e 2,79% (lodo II).

Estes valores identificados podem ter variação devido á concentração de sólidos presentes no efluente, assim como as reações com os produtos químicos utilizados na limpeza e higienização dos setores, bem como os utilizados no próprio sistema de tratamento de efluentes.

Outro fator a ser considerado é a eficiência no tridecanter, pois se a temperatura de cozimento não se mantiver no intervalo de 94 °C a 96 °C, perde-se sólidos para o clarificado, a umidade do lodo desidratado tende a ficar mais elevado e pode ocorrer perdas de óleo tanto para a fase líquida, quanto para a fase sólida.

Nas amostras analisadas foi identificado uma elevada quantidade de óleos e graxas presentes em ambas as amostras de lodo caracterizadas, sendo estes resultados apresentados no Gráfico 3.

GRÁFICO 3 – ANÁLISE DE ÓLEOS E GRAXAS NAS AMOSTRAS DE LODO IN NATURA



FONTE: A autora (2017).

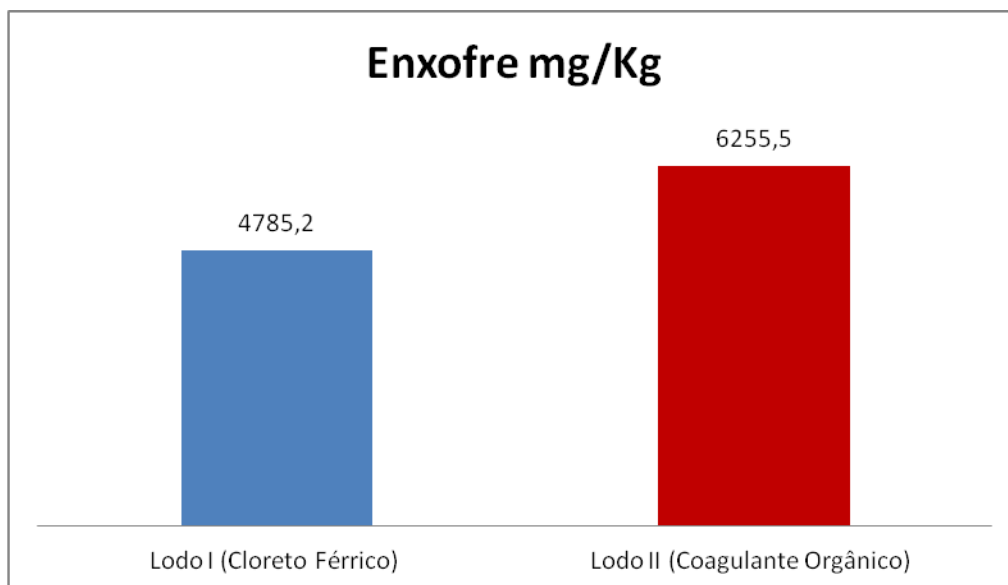
Este alto índice de óleos e graxas presentes nas amostras contribuem para o aumento do poder calorífico das amostras, sendo que o valor deste parâmetro também está relacionado com a temperatura do cozimento do lodo, a concentração de sólidos presentes, assim como ajustes no nível de líquido do equipamento (tridecanter).

Segundo Batistella (2015), os conteúdos de C e H contribuem para o alto poder calorífico, enquanto o CF (carbono fixo) é responsável pela manutenção e estabilidade da queima do lodo.

De acordo com Obernberger e colaboradores (2006), combustíveis com concentrações de N acima de 0,6% podem apresentar emissões de NO_x durante a combustão e podem ultrapassar os limites da legislação.

Para o elemento enxofre (S), a diferença foi significativa, sendo que o Lodo II apresentou valor 21,9% superior a quantidade de enxofre identificada no Lodo I, conforme apresentado no gráfico 4.

GRÁFICO 4 – ANÁLISE DE ENXOFRE NAS AMOSTRAS DE LODO IN NATURA



FONTE: A autora (2017).

O enxofre contido no combustível forma principalmente SO_2 , SO_3 e sulfatos de metais alcalinos e alcalino-terrosos (OBERNBERGER et al., 2006). A presença de índices de enxofre no material pode ocasionar corrosão caso a queima não seja eficiente.

Segundo Floriani (2007), a reação do enxofre com o oxigênio é praticamente 100% eficiente, o que quer dizer que para cada 1 grama de enxofre no combustível, cerca de 1,9 gramas de SO_2 são formados. Através da oxidação fotoquímica, o SO_2 reage com o oxigênio da atmosfera formando o trióxido de enxofre SO_3 . Este ao entrar em contato com a umidade é facilmente convertido em ácido sulfúrico (H_2SO_4), que é o causador da chuva ácida e da corrosão nos equipamentos. Sendo que a reação do dióxido de enxofre com a molécula de água origina também o H_2SO_3 (ácido sulfuroso), composto também responsável pela corrosão de equipamentos e tubulações. Porém, se todo o enxofre contido no combustível for queimado completamente, será formado somente dióxido de enxofre.

Na Tabela 8 se apresenta alguns compostos químicos encontrados nas amostras de lodo in natura, e realiza uma comparação com os padrões estabelecido no artigo 3º da Resolução SEMA 042/2008, que dispõe sobre critérios para a queima de resíduos em caldeiras.

TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSTOS QUÍMICOS PRESENTES NAS AMOSTRAS DE LODO COM A RESOLUÇÃO SEMA 042/2008

Parâmetro	Unidade	Lodo I (Cloreto Férrico)	Lodo II (Coagulante Orgânico)	SEMA 042/2008	Atendimento SEMA 042/20018
Arsênio	mg/Kg	6,7	<0,4902	1,00	Lodo I, não atende normativa
Cádmio	mg/Kg	7,18	<0,245	0,50	Lodo I, não atende normativa
Cobalto	mg/Kg	17,6	<0,4902	1,00	Lodo I, não atende normativa
Chumbo	mg/Kg	2,15	<0,4902	1,00	Lodo I, não atende normativa
Mercúrio	mg/Kg	<0,001	<0,001	0,50	Ambas amostras atendem normativa
Níquel	mg/Kg	11,9	7,05	1,00	Ambas amostras não atendem normativa
Selênio	mg/Kg	<0,4902	<0,4902	1,00	Ambas amostras atendem normativa
Telúrio	mg/Kg	<2,5	<2,5	1,00	Ambas amostras atendem normativa
Tálio	mg/Kg	<0,4902	<0,4902	0,50	Ambas amostras atendem normativa

FONTE: A autora (2017).

Conforme os dados apresentados na tabela 8, pode-se observar que para as concentrações presentes na amostra de Lodo I, os índices de Arsênio, Cádmio, Cobalto, Chumbo e Níquel, foram superiores aos resultados da amostra de Lodo II.

Comparando os dados obtidos com os estabelecidos na Resolução SEMA nº 042/2008, observa-se que os elementos Mercúrio, Selênio, Telúrio e Tálio atendem os requisitos da normativa na avaliação da amostra in natura de ambos os lodos. Porém, para os elementos Arsênio, Cádmio, Cobalto, Chumbo e Níquel detectados na amostra de lodo I, os mesmos não atendem a normativa. Para o elemento Níquel ambas as amostras de lodo não atendem.

Porém, cabe ressaltar que os valores citados na tabela 8 referem-se ao lodo puro, in natura, sem mistura com o combustível principal.

O artigo 2º desta resolução define que o combustível principal não pode ser descaracterizado, sendo considerado por descaracterização do combustível principal, as situações:

- a. por quantidade: uma mistura de resíduo com combustível principal na qual o resíduo representa uma parcela acima de 20% por peso da mistura;
- b. por poder calorífico: uma mistura de resíduo com combustível principal na qual o resíduo representa uma parcela acima de 20% do poder calorífico da mistura;
- c. por composição química: mistura de resíduo com combustível principal com teores de Cl, F, Sb, Cr, Cu, Mn, V e Sn da mistura elevados em mais de 50% relativos à composição do combustível principal; (Resolução SEMA nº 042/2008).

Sendo que ao considerar o balanço energético da mistura do combustível principal (cavaco) com um % de lodo inferior a 20%, estes valores tendem a diminuir significativamente, pois o cavaco não tem histórico de apresentar teores destes elementos em sua composição.

4.1.2 Caracterização NBR 10.004

Foi realizado em laboratório credenciado os ensaios para a classificação de resíduos conforme a NBR 10.004: massa bruta, apresentados na Tabela 9, e os ensaios de Extrato Lixiviado (NBR 10.005) e Extrato Solubilizado (NBR 10.006), apresentados no Apêndice A e Apêndice B.

TABELA 9 – CARACTERIZAÇÃO DO LODO IN NATURA

Parâmetro	Unidade	Lodo II		
		Lodo I (Cloreto Férrico)	(Coagulante Orgânico)	Parâmetro NBR 10.004
pH (Suspensão 1:1)		5,96	6,23	2,0 - 12,5
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	< 1	< 1	500
Porcentagem de Sólidos	%	38,4	40,4	
Cianeto (como HCN)	mg/kg	0,2	0,1	250

FONTE: A autora (2017).

Com os resultados apresentados na tabela 9, assim como os do Apêndice A e Apêndice B, pode-se resumir a caracterização realizada nas amostras de lodo in natura, conforme tabela abaixo.

TABELA 10 – CLASSIFICAÇÃO CONFORME NBR 10.004:2004

VMP NBR 10.004:2004	Lodo I (Cloreto Férrico)	Lodo II (Coagulante Orgânico)
MASSA BRUTA (Tabela 9)	Todos os parâmetros satisfazem os limites permitidos	Todos os parâmetros satisfazem os limites permitidos
LIXIVIADO (Apêndice A)	Os parâmetros Ferro, Índices de Fenóis, Manganês ultrapassaram os limites máximos permitidos	Os parâmetros Ferro, Índices de Fenóis, Manganês ultrapassaram os limites máximos permitidos da norma
SOLUBILIZADO (Apêndice B)	Todos os parâmetros satisfazem os limites permitidos	Todos os parâmetros satisfazem os limites permitidos
CLASSIFICAÇÃO NBR 10.004:2004	CLASSE II A - RESÍDUO NÃO INERTE	CLASSE II A - RESÍDUO NÃO INERTE

FONTE: A autora (2017).

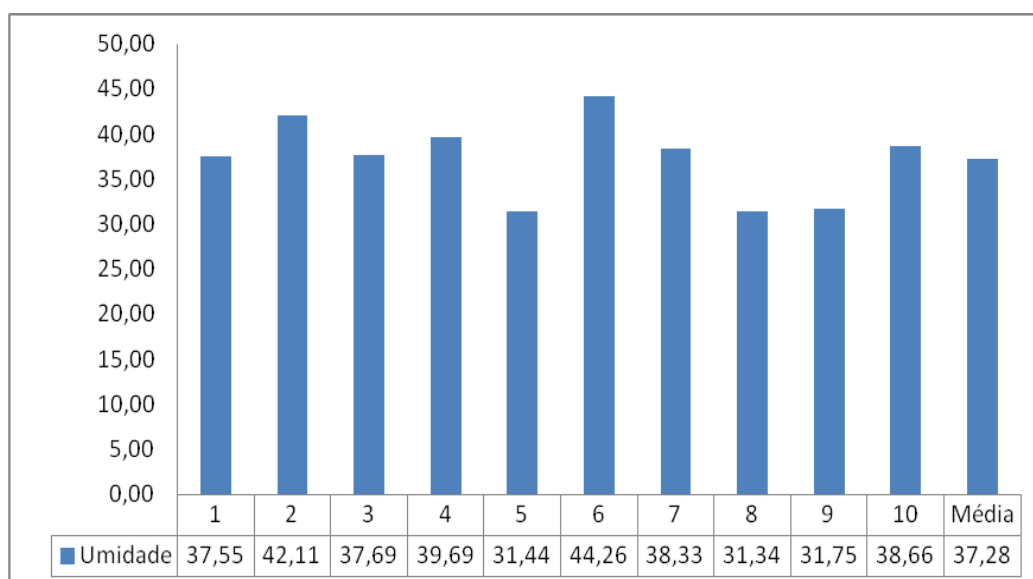
Um resíduo é classificado como Classe II A (Não Inerte) quando um ou mais parâmetros do solubilizado estiverem acima dos valores máximos permitidos pelo Anexo G da NBR 10004:2004.

Neste estudo ambos os lodos em estudo foram classificados como Classe II A, ou seja resíduo não inerte.

4.1.3 Caracterização do cavaco utilizado nas amostras

Durante as 10 coletas de cavaco realizadas no abatedouro I, no período de 13/09 a 25/10/2016 foi realizada a análise de teor de umidade por amostra de cavaco coletada, sendo os resultados apresentados no Gráfico 5.

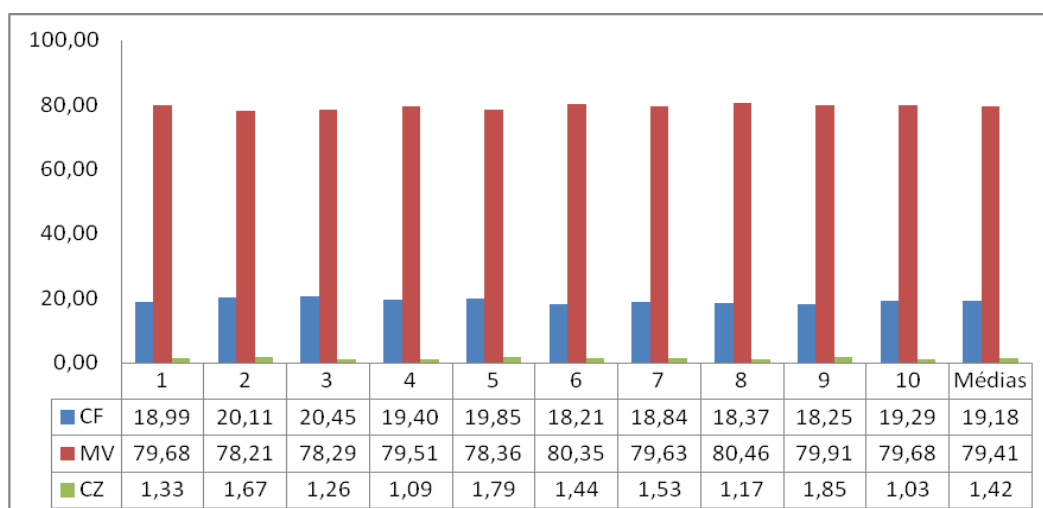
GRÁFICO 5 – TEOR DE UMIDADE DAS AMOSTRAS DE CAVACO COLETADO NO ABATEDOURO I



FONTE: A autora (2017).

A média de umidade obtida foi de 37,28%. Os resultados para as análises de teor de material voláteis (TMV), teor de cinzas (TCZ) e teor de carbono fixo (TCF) encontrados para as 10 amostras de cavaco coletadas no abatedouro I, encontram-se no gráfico 6.

GRÁFICO 6 – ANÁLISE IMEDIATA DO CAVACO COLETADO NO ABATEDOURO I

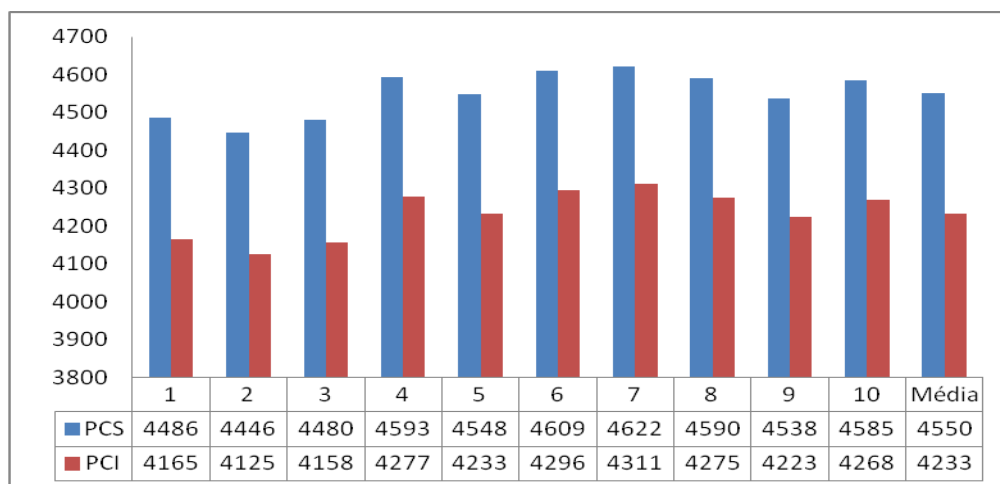


FONTE: A autora (2017).

O valor médio encontrado para as análises imediata das 10 amostras foi de 19,18% para TCF, 79,41% para TMV e 1,42% para TCZ.

Também foi realizada as análises de poder calorífico superior (PCS) e posteriormente calculou-se o resultado para o poder calorífico inferior (PCI), conforme apresentado no gráfico 7.

GRÁFICO 7 – ANÁLISE PODER CALORÍFICO DAS AMOSTRAS DE CAVACO COLETADO NO ABATEDOURO I



FONTE: A autora (2017).

Evidencia-se através dos resultados obtidos para as amostras de cavaco, que além da umidade, outros fatores também podem interferir no PCS, entre eles pode-se citar a idade do corte do eucalipto e o período entre o corte e sua utilização.

A Tabela 11 representa a comparação da análise imediata de cavaco segundo os autores Virmond (2007), Borges (2015) e o trabalho realizado.

TABELA 11 – COMPARAÇÃO DA ANÁLISE IMEDIATA DE CAVACO

Autores			VIRMOND (2007)	BORGES (2015)	AUTORA (2017)
			Cavaco de Eucalipto	Cavaco de Eucalipto Seco	Cavaco de Eucalipto
Biomassa					
Análise Imediata	Umidade	%	54,14	9,4	37,28
	Teor de Voláteis	%	81,94	83,23	79,41
	Cinzas (base seca)	%	0,52	0,56	1,42
	Carbono Fixo	%	17,54	16,42	19,18

FONTE: A autora (2017).

Segundo Bizzo (2003), a biomassa cavaco de eucalipto é caracterizada por possuir baixo teor de cinzas, ausência total de enxofre e umidade variável, devido as condições de armazenagem.

4.1.4 Análise imediata e de Poder calorífico das amostras de lodo adicionadas ao cavaco em diferentes %

Na Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos para a análise imediata das amostras preparadas com % de mistura de lodo com o cavaco, conforme planejamento experimental apresentado na Tabela 6 (item 3.2.2).

TABELA 12 – ANÁLISE IMEDIATA AMOSTRAS DE LODO ADICIONADAS AO CAVACO

Amostras	Carbono (%b.s.)	Voláteis (%b.s.)	Cinzas (%b.s.)
A	15,06	83,54	1,37
B	17,72	83,03	2,23
C	13,42	83,39	3,16
D	15,27	84,47	1,18
E	14,04	83,55	1,35
F	14,995	83,33	1,65
G	15,4	84,04	0,53
H	8,61	82,35	9,017
I	11,17	84,58	4,24

FONTE: A autora (2017).

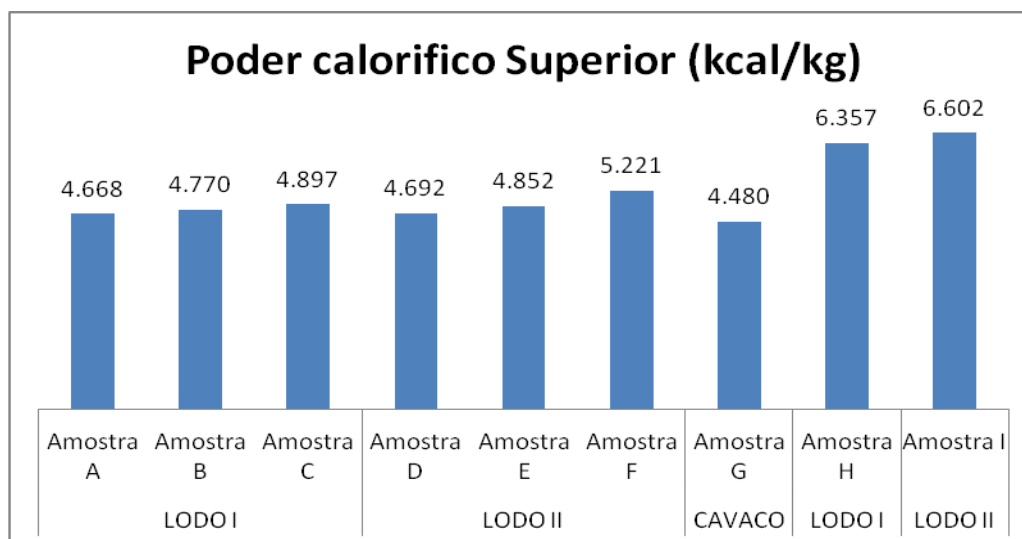
As amostras A, B e C são amostras compostas pelo Lodo I adicionado os percentuais de 10, 20 e 30% ao cavaco, enquanto as amostras D, E e F são amostras compostas pelo Lodo II adicionado ao cavaco, nos mesmos percentuais.

As amostras G, H e I, referem-se a resultados de cada material in natura, sem mistura.

Observa-se em ambas amostras de misturas entre o cavaco e o lodo, que conforme o aumento da fração de lodo no cavaco, ocorre um incremento no teor de cinzas, sendo que não é possível observar uma relação para o teor de materiais voláteis.

O Gráfico 8 apresenta os resultados do poder calorífico superior obtidos das respectivas amostras.

GRÁFICO 8 – ANÁLISE DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DAS AMOSTRAS DE LODO INCORPORADAS AO CAVACO



FONTE: A autora (2017).

Pode-se observar que a amostra I composta exclusivamente de Lodo II, apresentou um poder calorífico 3,71% superior ao da amostra H, composta somente pelo Lodo I.

Evidencia-se que as amostras C e F, que apresentam uma mistura de 30% de lodo com 70% de cavaco, apresentam os maiores valores de poder calorífico por grama de material. Desta forma, o PCS cresceu com o aumento do percentual de lodo adicionado ao cavaco, ou seja, quanto maior a quantidade de lodo na mistura, maior o seu poder calorífico.

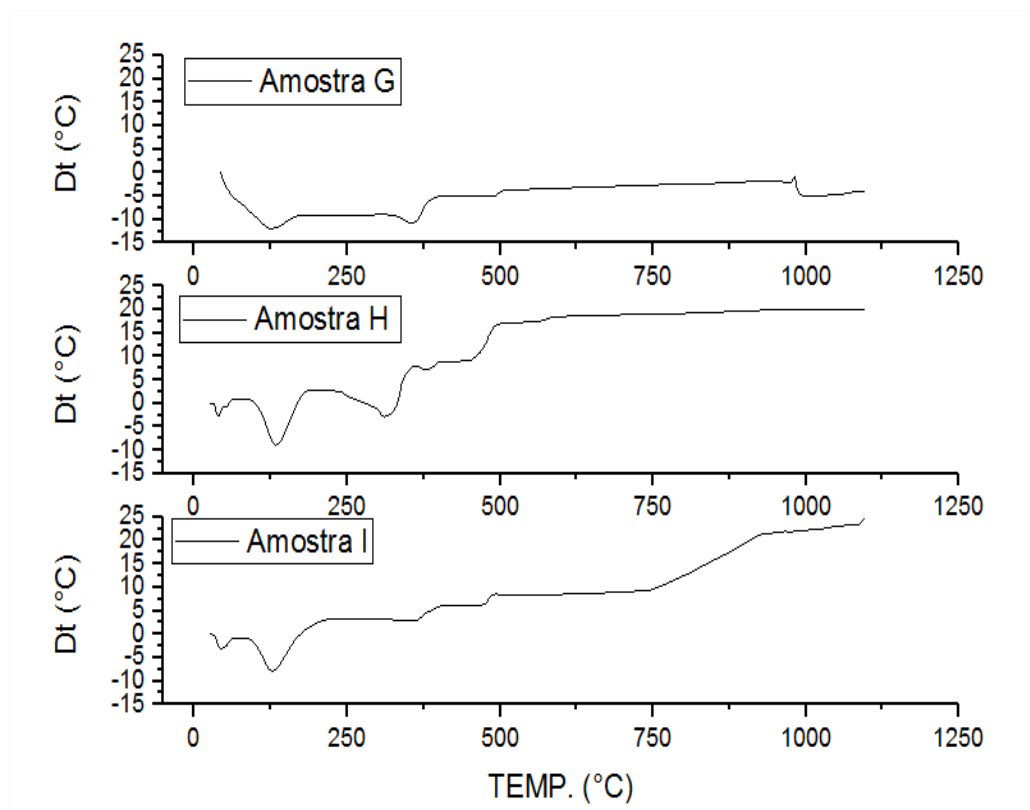
Porém, em escala industrial não foi realizada a combustão do lodo puro, principalmente em virtude da alta umidade presente neste material (65%) e também aos elevados percentuais de metais encontrados nas amostras de lodo I, fato que trouxe uma preocupação com os gases poluentes que poderiam ser emitidos.

Porém mesmo com apenas 10% de adição de lodo em ambas as amostras houve um incremento no poder calorífico superior de 4,19% e 4,73% respectivamente comparado com o poder calorífico superior do cavaco, que atualmente é o combustível principal que alimenta as caldeiras dos frigoríficos avaliados.

4.1.5 Análise Térmica Diferencial (ATD)

No Gráfico 9 podem ser observados os resultados das análises térmicas diferencial realizadas nas amostras de cavaco puro, do lodo I e do lodo II misturadas ao cavaco em diferentes percentuais conforme o planejamento experimental citado na tabela 6.

GRÁFICO 9 – ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL NAS AMOSTRAS DE LODO I, LODO II E CAVACO



FONTE: A autora (2017).

A amostra G representa a ATD do cavaco puro, a amostra H do Lodo I, e a amostra I para o Lodo II.

Segundo Gonçalves (2010), as perdas de massa em temperaturas próximas a 100 °C, geralmente referem-se à liberação de umidade contida na biomassa, sendo que até 150°C os picos endotérmicos estão relacionados a evaporação da água.

Müller e colaboradores (2014) realizaram uma avaliação das curvas de análise térmica para o elemento cloreto férrico, e evidenciaram três eventos de perda de massa, sendo que o primeiro ocorre na faixa de temperatura entre 25 e 120 °C (processo endotérmico) e é atribuída a moléculas de água fracamente ligadas (hidratação). O segundo evento ocorre na faixa de temperatura de 120 - 210 °C (processo endotérmico), atribuído à perda de massa de moléculas de água fortemente ligadas (dehidroxilação). O terceiro evento ocorre entre 320 a 500 °C (processo exotérmico), está relacionado com a decomposição de cloreto férrico anidro com desprendimento $\text{HCl}_{(g)}$ e $\text{Cl}_{2(g)}$. Após este último evento forma-se óxido de ferro ($\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)}$).

Os três picos supracitados, foram evidenciados na amostra H que continha o lodo I gerado com o coagulante cloreto férrico, sendo um pequeno pico na temperatura de 40,1 °C, o segundo aos 133 °C e o terceiro em 311 °C.

Para o coagulante orgânico não foi identificado na literatura estudo que avalie o comportamento térmico deste composto.

Portanto, pode-se afirmar que ambas amostras demonstradas no gráfico 9, apresentaram um pico endotérmico antes dos 200 °C, provavelmente em virtude de reações de desidratação, sendo que as duas amostras de lodo apresentam dois picos antes dos 200 °C, podendo estar associado aos eventos de hidratação e dehidroxilação.

Na região dos 320 a 400 °C observou-se um comportamento semelhante entre a amostra H (lodo I) e amostra G (cavaco), ocorrendo outro pico endotérmico. Observa-se, porém que na amostra H a partir de 335 °C ocorrem eventos exotérmicos, sendo que na amostra I estes eventos ocorrem a partir de 174 °C.

Segundo Ionashiro (2005) o pico endotérmico é atribuído à desidratação e os picos exotérmicos a oxidação da matéria orgânica.

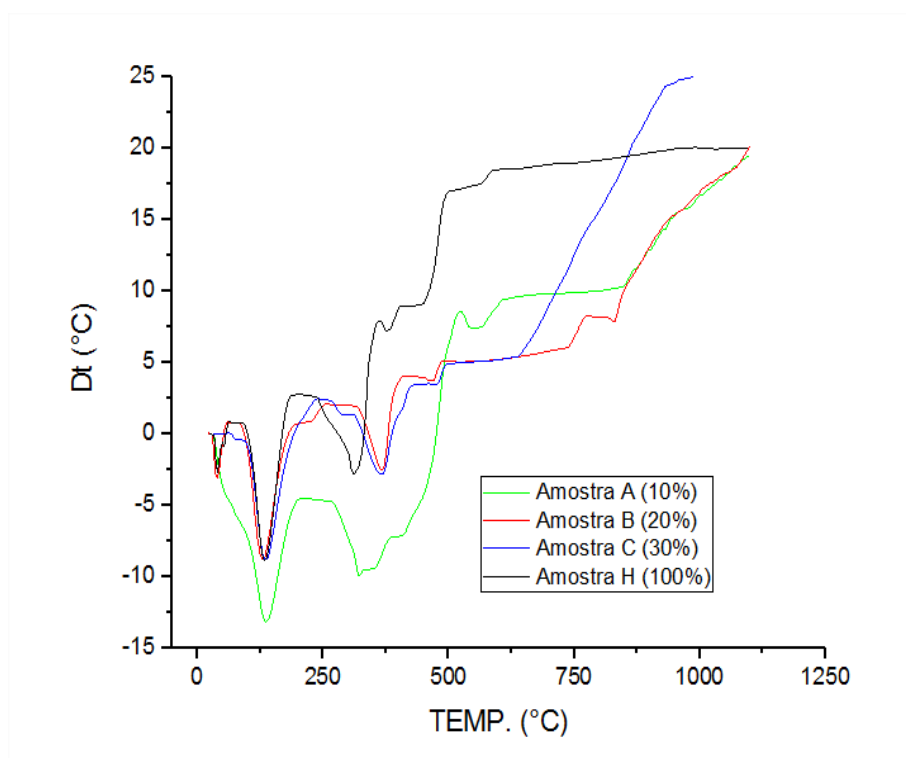
Avaliando a decomposição térmica da madeira, Pereira e colaboradores (2013) verificaram que a partir de temperaturas próximas a 400 °C a degradação térmica da madeira se tornou menor, correspondendo, principalmente, à degradação

de lignina. Nessa temperatura, a celulose e as hemiceluloses, componentes químicos em maior proporção na madeira, já foram degradadas. Sendo que a degradação da celulose é endotérmica, porém tal degradação origina produtos que sofrem degradação secundária, que é exotérmica. Observou-se também que a liberação de calor inicia-se em temperaturas acima de 275 °C, evidenciando que os componentes químicos da madeira começam a se decompor a partir dessa temperatura,

Oliveira (2003) relata que quanto maior a formação de produtos gasosos, maior também a energia liberada.

O gráfico 10 realiza uma comparação das amostras A, B e C, sendo respectivamente a variação de 10, 20 e 30% de lodo I (cloreto férrico) misturado com cavaco, e a amostra H que representa o lodo I puro.

GRÁFICO 10 – ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL NAS AMOSTRAS DE LODO I



FONTE: A autora (2017).

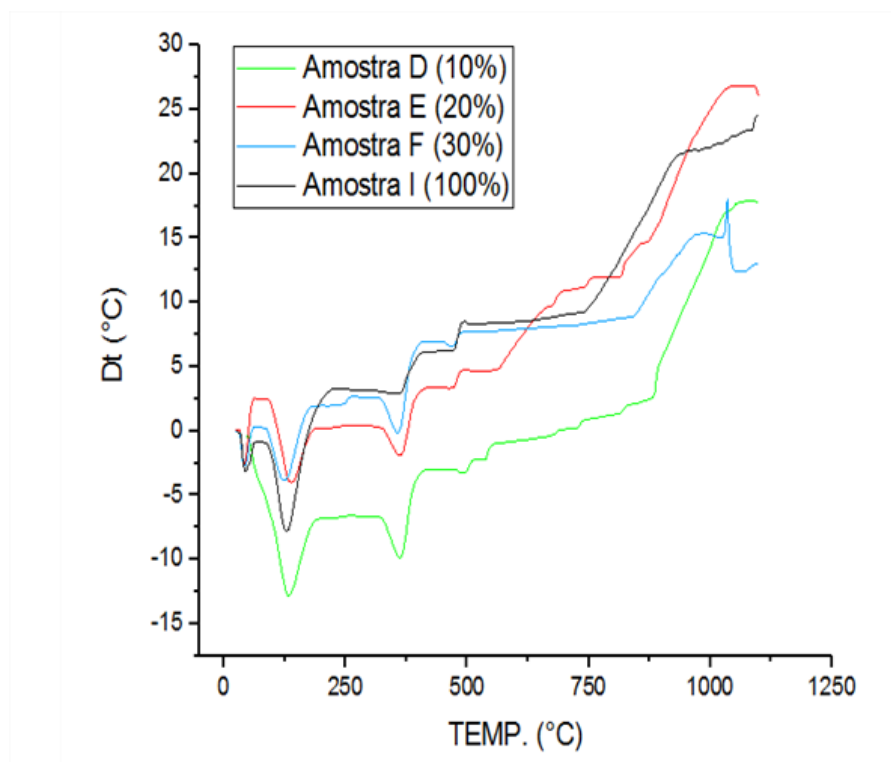
Analisando o gráfico 10, ambas as curvas de ATD das amostras apresentaram o primeiro pico na temperatura entre 34 e 40,1 °C, e o segundo entre 129 e 138 °C, ambos endotérmicos. Nestas faixas estes picos representam a liberação de umidade dos materiais. Nesta temperatura a natureza da reação está

relacionada a liberação de compostos voláteis. O terceiro pico ocorreu na temperatura após os 260 °C.

Na amostra H a reação passou a ser exotérmica a partir de 335 °C, e nas amostras A, B e C, esta reação ocorreu somente após os 380 °C.

No gráfico 11 se apresenta a comparação das amostras D, E, F, sendo respectivamente a variação de 10, 20 e 30% de lodo II (coagulante orgânico) misturado com cavaco, e a amostra I que representa o lodo II puro.

GRÁFICO 11 – ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL NAS AMOSTRAS DE LODO II



FONTE: A autora (2017).

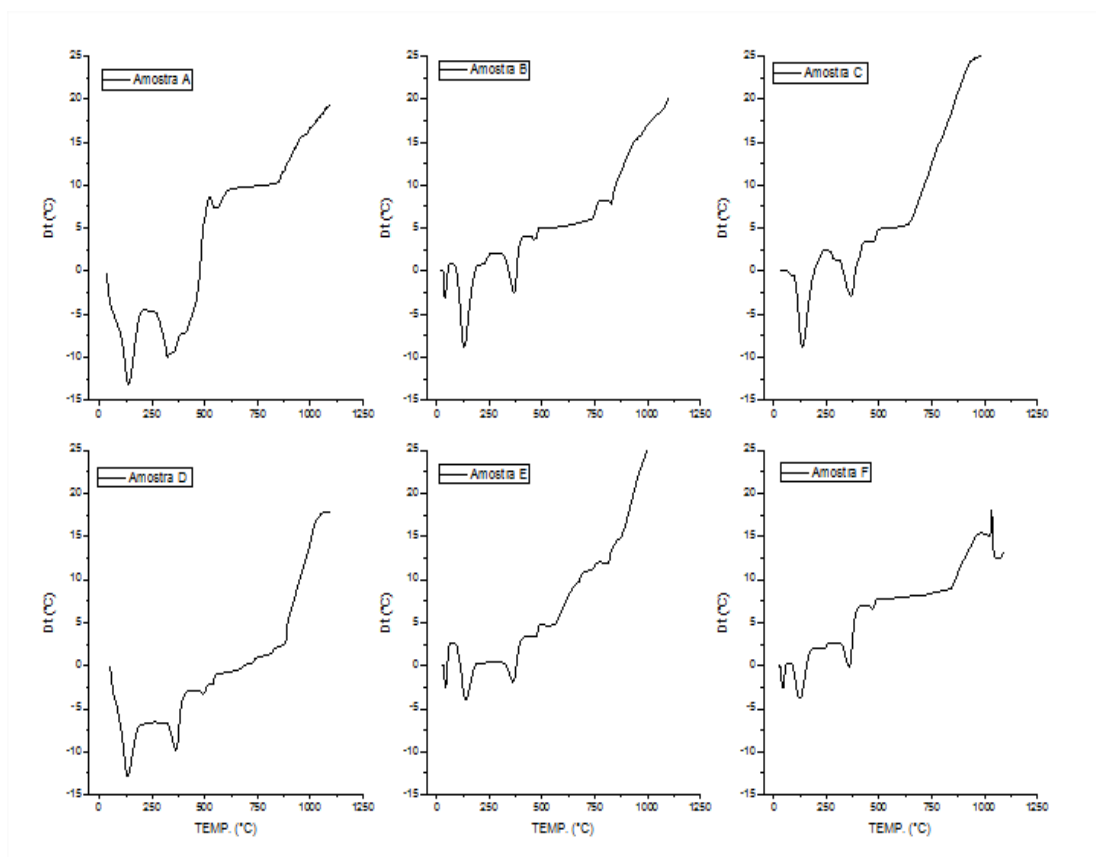
Analizando o gráfico acima, ambas as curvas de análise térmica diferencial das amostras apresentaram o primeiro pico na temperatura entre 41 a 44 °C, e o segundo entre 60 a 90 °C, ambos endotérmicos. Nestas faixas estes picos representam a liberação de umidade dos materiais. O terceiro pico ocorreu na temperatura após os 375 °C. Nesta temperatura a natureza da reação esta relacionada a liberação de compostos voláteis.

A liberação de energia para a amostra I, contendo o lodo II puro, ocorreu a partir dos 174 °C, sendo que para a amostra D, composta por 10% de lodo

adicionado ao cavaco, que passou a exotérmica somente após os 680 °C, e para as amostras E e F, a reação exotérmica ocorreu após 360 °C.

O gráfico 12 apresenta a comparação das amostras contendo o lodo I (cloreto férrico) e as amostras contendo o lodo II (coagulante orgânica) e seus respectivos % de mistura com o cavaco.

GRÁFICO 12 – ATD NAS AMOSTRAS DE LODO I E LODO II



FONTE: A autora (2017).

Virmond (2007), analisou a combustão do lodo frigorífico, identificou-se um pequeno ganho de massa no início da curva de combustão. A partir de temperaturas entre 210 e 612 °C, aproximadamente, podem ser relacionados a compostos orgânicos de diferentes origens juntamente com a matéria volátil, com contribuição à perda de massa total. Após 520 °C ocorre a combustão do carbono fixo restando ainda as cinzas.

Segundo a classificação de diferentes biomassas proposta por Heikkinen e colaboradores (2004), o lodo frigorífico é constituído majoritariamente de compostos

orgânicos de baixa estabilidade, sendo que o número de picos e a diversidade na sua localização estão relacionados à composição bioquímica do lodo.

4.2 COMPARAÇÃO DA COMBUSTÃO DO CAVACO PURO COM O LODO ADICIONADO AO CAVACO

Após a caracterização dos materiais em laboratório, o planejamento inicial do trabalho era realizar os testes de queima do lodo juntamente com o cavaco em laboratório para identificar a melhor proporção de cavaco e lodo, com a menor emissão atmosférica, porém evidenciou-se a dificuldade de encontrar um local com capacidade técnica e com viabilidade financeira para realização dessas amostragens.

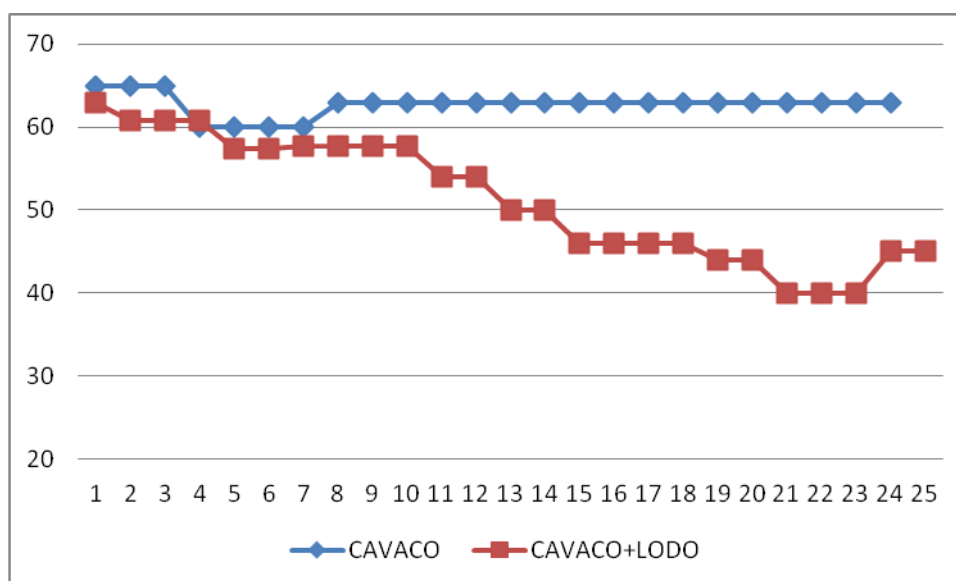
Desta forma, optou-se por definir o uso do resíduo gerado em uma das plantas em estudo e realizar o teste in loco, com o objetivo de comprovar a eficiência de queima do resíduo e também avaliar se as análises de emissões atmosféricas básicas para a queima de madeira ficariam dentro do permitido em legislação. Portanto, definiu-se pela utilização de 10% de lodo adicionado ao cavaco para o teste em escala industrial no abatedouro I.

Não foi solicitado autorização de teste ao órgão ambiental conforme descrito na Resolução CONAMA 316/2002, por considerar que o lodo a ser queimado juntamente com o combustível principal (cavaco) é uma biomassa de alto poder calorífico com uma oportunidade de aproveitamento econômico, não se enquadrando na definição de resíduo citada nesta legislação.

Inicialmente avaliou-se a caldeira operando com 100% do combustível principal (cavaco), seguido dos testes de dosagem de combustível auxiliar (lodo). Avaliou-se a eficiência térmica do equipamento, assim como alguns gases emitidos para a atmosfera.

O Gráfico 13 demonstra a alteração na velocidade da rosca de alimentação do combustível, em Hz, durante o teste com o cavaco puro e posteriormente com a inserção de 10% do lodo adicionado ao cavaco. O Gráfico 14 ilustra a oscilação da pressão gerada no período do teste com ambos combustíveis.

GRÁFICO 13 – VELOCIDADE DA ROSCA DE ALIMENTAÇÃO (Hz)



FONTE: A autora (2017).

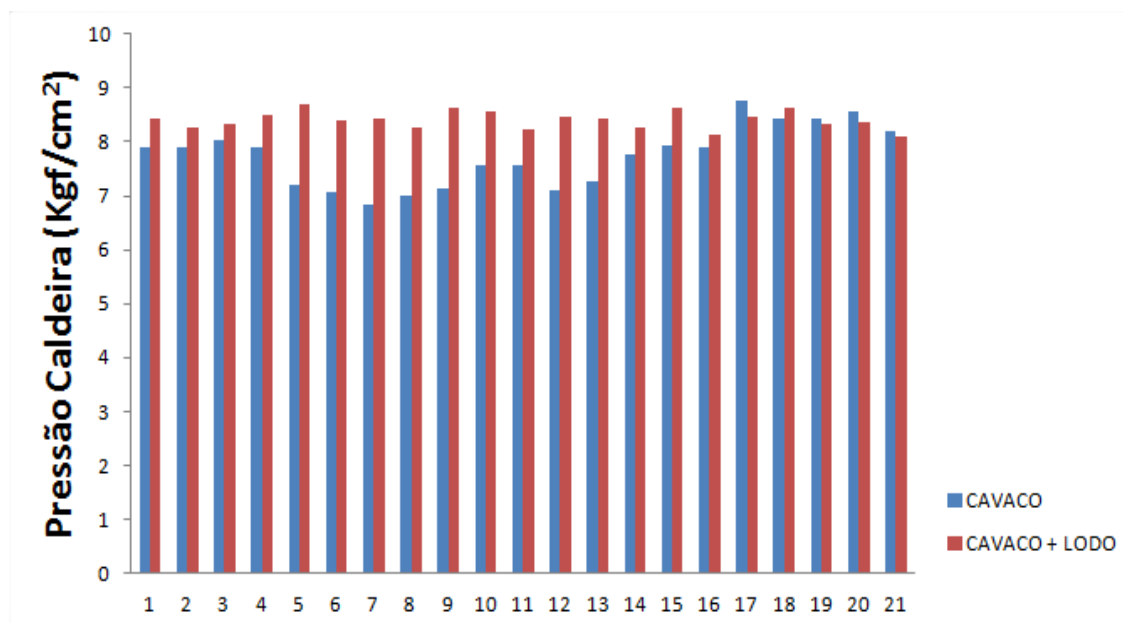
A velocidade média da rosca de alimentação durante a queima do cavaco foi de 62,71 Hz. Sendo que no início do teste a mesma estava com velocidade de 65 Hz, e ao diminuir a velocidade para 60 Hz, a caldeira apresentou uma queda de pressão. Após regular a velocidade em 63 Hz, a pressão da caldeira apresentou uma média de 7,73 kg f/cm².

Após a inserção de 10% de lodo adicionado ao cavaco, evidenciou-se que a estabilidade da caldeira foi aumentando ocasionando a parada da rosca de alimentação devido a pressão ter atingido o nível máximo de trabalho que é de 8 Kgf/cm². Desta forma, a velocidade da rosca de alimentação foi diminuída gradativamente, de forma a manter a pressão estável e evitar excesso de combustível na grelha, o que poderia ocasionar uma queima incompleta do combustível.

Estima-se que durante o teste da queima do lodo adicionado ao cavaco, a velocidade foi diminuída tanto pelo aumento do poder calorífico devido a inserção do lodo, quanto a granulometria, já que o lodo ao se misturar com o cavaco ocupa a superfície livre dentro da rosca de alimentação.

A velocidade média da rosca de alimentação durante a queima do lodo adicionado ao cavaco foi de 52,24 Hz, e a pressão média atingida foi de 8,3 Kgf/cm².

GRÁFICO 14 – COMPARAÇÃO DA PRESSÃO DA CALDEIRA DURANTE OS TESTES DE QUEIMA UTILIZANDO CAVACO PURO E CAVACO+LODO



FONTE: A autora (2017).

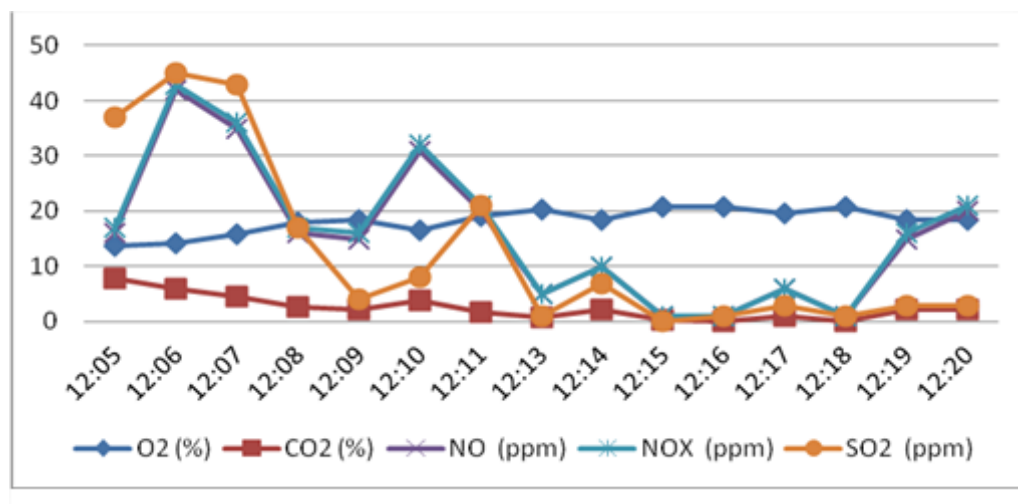
Analisando os dados foi possível confirmar que com o incremento do lodo adicionado ao cavaco, aumentou-se o poder calorífico do combustível, e consequentemente a pressão da caldeira ficou mais estável, contribuindo desta forma para diminuir a velocidade da rosca de alimentação de combustível.

4.3 RESULTADOS DAS ANÁLISES DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

O poluente amostrado analisado para comparação com os padrões, estabelecido pela Resolução SEMA 016/14 para a geração de calor ou energia utilizando derivados de madeira como combustível para caldeiras existentes com potência térmica nominal menor que 10 MW, é somente o CO e a análise do O₂ referencial. Porém para a realização do estudo, optou-se também pela realização das análises de MP, NO_x e SO_x.

O Gráfico 15 demonstra os resultados da amostragem dos gases emitidos na combustão do cavaco na caldeira.

GRÁFICO 15 – ANÁLISE DOS GASES EMITIDOS NA COMBUSTÃO DO CAVACO

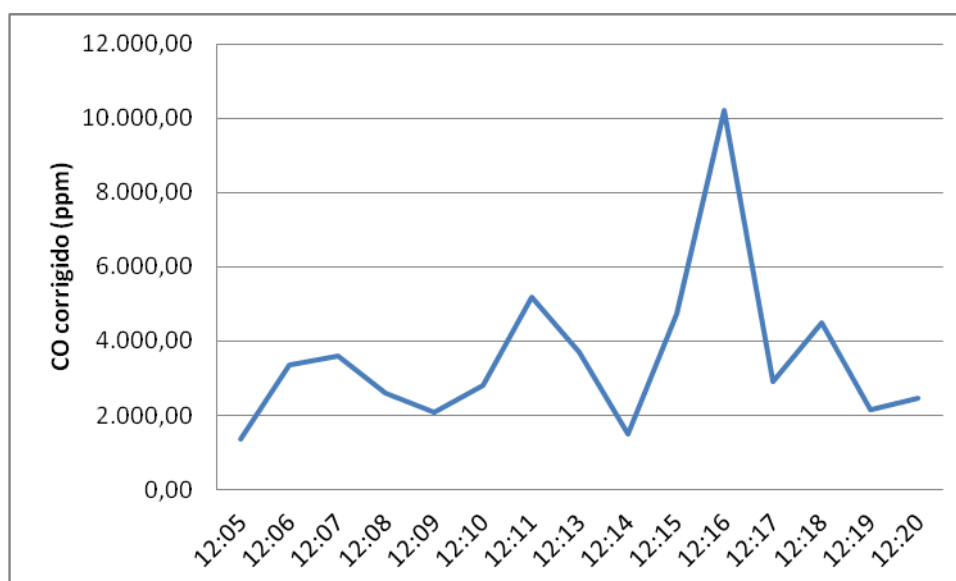


FONTE: A autora (2017).

O gráfico acima apresenta os resultados obtidos no equipamento, sem correção do O₂, conforme descrito na respectiva normativa.

O gráfico 16 ilustra os valores corrigidos para o percentual de 11% de O₂ nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP).

GRÁFICO 16 – ANÁLISE DE CO EMITIDO NA COMBUSTÃO DO CAVACO CORRIGIDOS PARA 11% DE O₂



FONTE: A autora (2017).

O Quadro 5 compara os resultados dos gases gerados no teste de combustão em caldeira utilizando como combustível o cavaco com a Resolução SEMA 016/14, que cita padrões para fontes existentes na combustão de derivados de madeira.

QUADRO 5 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA COMBUSTÃO DO CAVACO COM OS PADRÕES PARA FONTES EXISTENTES PARA COMBUSTÃO DE DERIVADOS DE MADEIRA

<i>Tipo de Medição:</i>	<i>Descontínua</i>					
<i>Data da Medição:</i>	<i>01/02/2017</i>					
<i>Local da Medição:</i>	<i>Orifício no duto vertical de exaustão, antes do motor de exaustão</i>					
<i>Combustível</i>	<i>Cavaco</i>					
<i>Oxigênio Referencial:</i>	<i>11%</i>					
<i>Vazão Base Seca:</i>	<i>16.437,5 Nm³/h</i>					
<i>Parâmetros Monitorados:</i>	<i>MP-total</i>	<i>SO_x</i>	<i>CO</i>	<i>NO_x</i>	<i>O₂</i>	<i>Outros</i>
<i>Média das Amostragens:</i>	390,9 mg/Nm ³	36,9 mg/Nm ³	750,8 mg/Nm ³	33,6 mg/Nm ³	18,6 %	N.A.
<i>Início da Medição:</i>	11:13 / 13:12 / 14:30	12:06				N.A.
<i>Final da Medição:</i>	12:13 / 14:12 / 15:30	12:21				N.A.
<i>Resultado corrigido para O₂ ref. 11% (mg/Nm³):</i>	1.628,5	150,8	3.542	137,1	N.A.	N.A.
<i>Padrão de Emissão (mg/Nm³):</i>	560	N.A.	2.500	N.A.	N.A.	N.A.
<i>Atendimento ao Padrão:</i>	NÃO	N.A.	NÃO	N.A.	N.A.	N.A.
<i>Taxa de Emissão Horária(kg/h):</i>	6,4	0,6	15,5	0,5	N.A.	N.A.
<i>Taxa de Emissão Anual(ton/ano):</i>	39,9	3,7	96,7	3,1	N.A.	N.A.

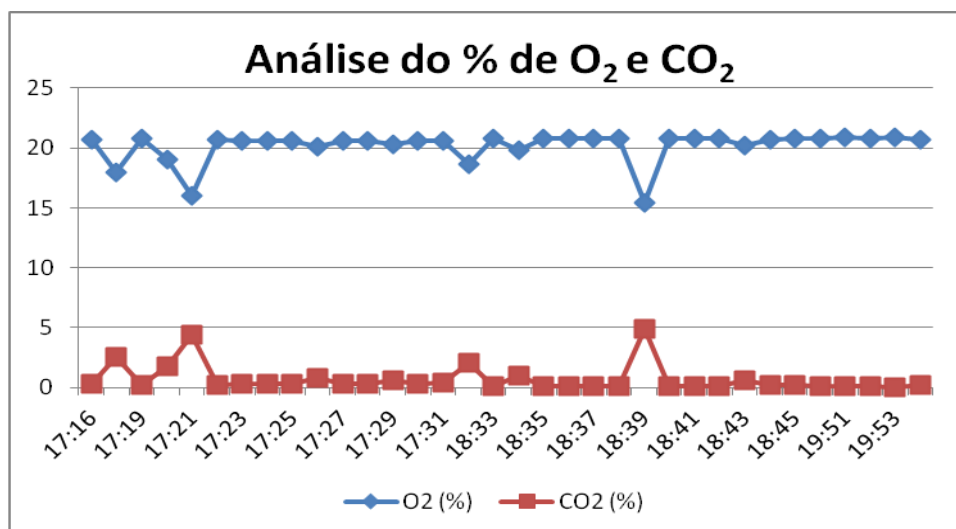
FONTE: A autora (2017).

Observa-se que mesmo com a combustão somente do cavaco, devido a alta umidade presente no combustível devido as condições climáticas no dia do teste e ao excesso de ar no equipamento, não foi possível atender a respectiva norma quando realiza-se a correção dos parâmetros para o oxigênio referencial de 11%.

Durante o período de teste da combustão do lodo I adicionado ao cavaco na alimentação da caldeira, foram realizadas três amostragens de 15 minutos cada.

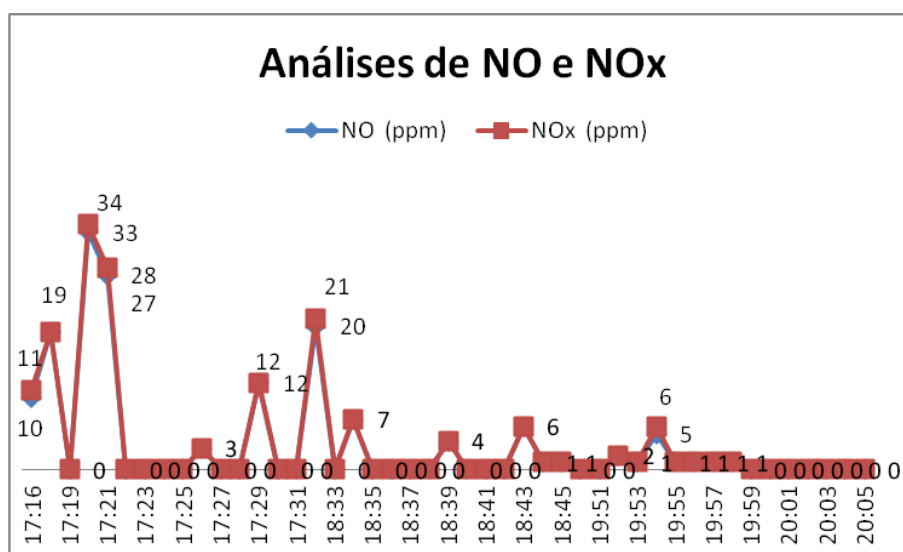
Os Gráficos 17 e 18, apresentados abaixo demonstram os resultados da amostragem dos gases emitidos na combustão de 10% do lodo I (cloreto férrico) adicionado ao cavaco na alimentação da caldeira.

GRÁFICO 17 – ANÁLISE DO % DE O₂ E CO₂ EMITIDOS NA COMBUSTÃO DO LODO ADICIONADO AO CAVACO



FONTE: A autora (2017).

GRÁFICO 18 – ANÁLISE DE NO E NO_x EMITIDOS NA COMBUSTÃO DO LODO ADICIONADO AO CAVACO

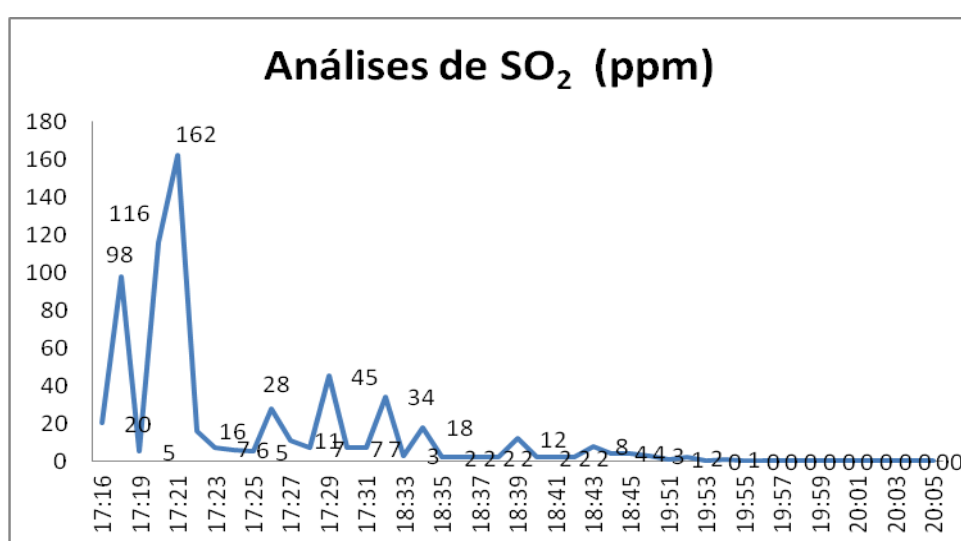


FONTE: A autora (2017).

Os resultados para os óxidos de nitrogênio (NO) são semelhantes aos valores encontrados para NO_x, que é a soma dos óxidos de nitrogênio com o dióxido de Nitrogênio (NO + NO₂), e por isso se sobrepõe no gráfico apresentado.

Os valores encontrados são menores que os padrões máximos permitidos de 500 mg/Nm³, conforme apresentado no gráfico 19.

GRÁFICO 19 – ANÁLISE DE SO₂ EMITIDOS NA COMBUSTÃO DO LODO ADICIONADO AO CAVACO

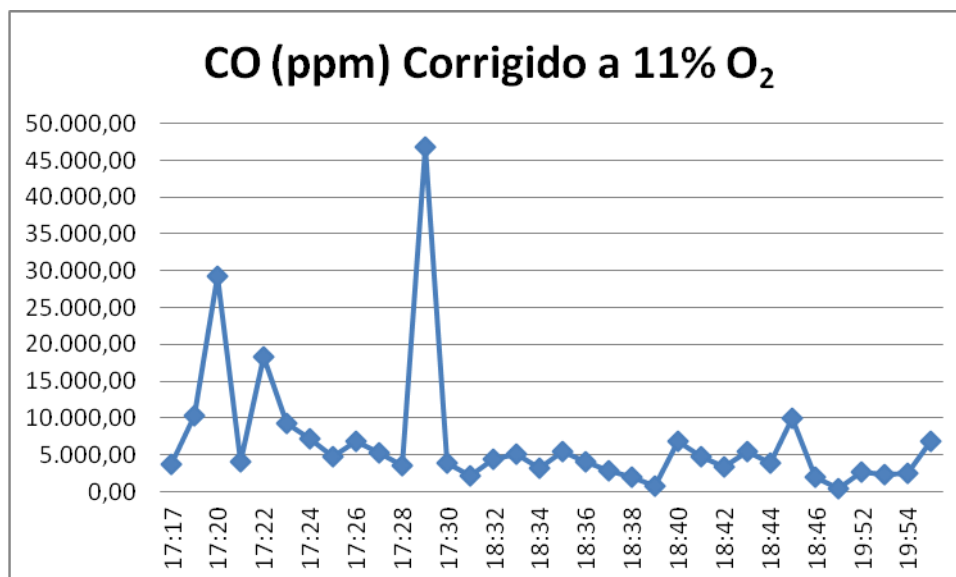


FONTE: A autora (2017).

As concentrações no início da amostragem foram mais elevadas, devido ao excesso de combustível, já que a velocidade da rosca de alimentação estava igual ao teste anterior, sendo que após a redução gradativa da velocidade de alimentação os valores para SO₂ foram se estabilizando. A concentração média deste composto no decorrer das três repetições foi de 69,5 ppm. A Resolução SEMA 016/14, não apresenta padrão referencial para o composto SO_x para a combustão de madeira.

O gráfico 20 ilustra os resultados corrigidos para oxigênio referencial de 11%, onde é possível observar alguns picos isolados apresentando um elevado teor de oxigênio, o que ocasiona consequentemente um aumento significativo na emissão de CO.

GRÁFICO 20 – ANÁLISE DE CO EMITIDO NA COMBUSTÃO DO CAVACO CORRIGIDOS PARA 11% DE O₂



FONTE: A autora (2017).

Observa-se, assim como ocorreu com as medições do cavaco puro, que não foi possível atender a respectiva norma quando se realiza a correção dos parâmetros para o oxigênio referencial de 11%. Este fato está relacionado à alta umidade presente no combustível devido as condições climáticas no dia do teste e ao excesso de ar no equipamento, que não teve como ser ajustado.

O quadro 6 apresenta todos os resultados corrigidos para o oxigênio referencial de 11% conforme a Resolução SEMA 016/2014.

QUADRO 6 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA COMBUSTÃO DO LODO E CAVACO COM OS PADRÕES PARA FONTES EXISTENTES PARA COMBUSTÃO DE DERIVADOS DE MADEIRA

Tipo de Medição:	Descontínua					
Data da Medição:	01/02/2017					
Combustível:	90% Cavaco + 10% Lodo I					
Local da Medição:	Orifício no duto vertical de exaustão, antes do motor de exaustão					
Oxigênio Referencial:	11%					
Vazão Base Seca:	15.790 Nm ³ /h					
Parâmetros Monitorados:	MP-total	SO _x	CO	NO _x	O ₂	Outros
Média das Amostragens:	285,7 mg/Nm ³	92,7 mg/Nm ³	1.343,2 mg/Nm ³	12,4 mg/Nm ³	20,1 %	N.A.
Início da Medição:	16:32 / 17:50 / 19:06	18:32				N.A.
Final da Medição:	17:32 / 18:50 / 20:06	18:47				N.A.
Resultado corrigido para O ₂ ref. 11% (mg/Nm ³):	3.174,8	1.013,2	14.673,3	135,9	N.A.	N.A.
Padrão de Emissão (mg/Nm ³):	560	N.A.	2.500	N.A.	N.A.	N.A.
Atendimento ao Padrão:	NÃO	N.A.	NÃO	N.A.	N.A.	N.A.
Taxa de Emissão Horária(kg/h):	4,5	1,4	21,2	0,2	N.A.	N.A.
Taxa de Emissão Anual(ton./ano):	28,1	8,7	132,3	1,2	N.A.	N.A.

FONTE: A autora (2017).

Cabe ressaltar que a média de temperatura dos gases coletados na chaminé foram de 207,5 °C para a queima do cavaco puro, e de 215,9 °C para a combustão do teste com o lodo.

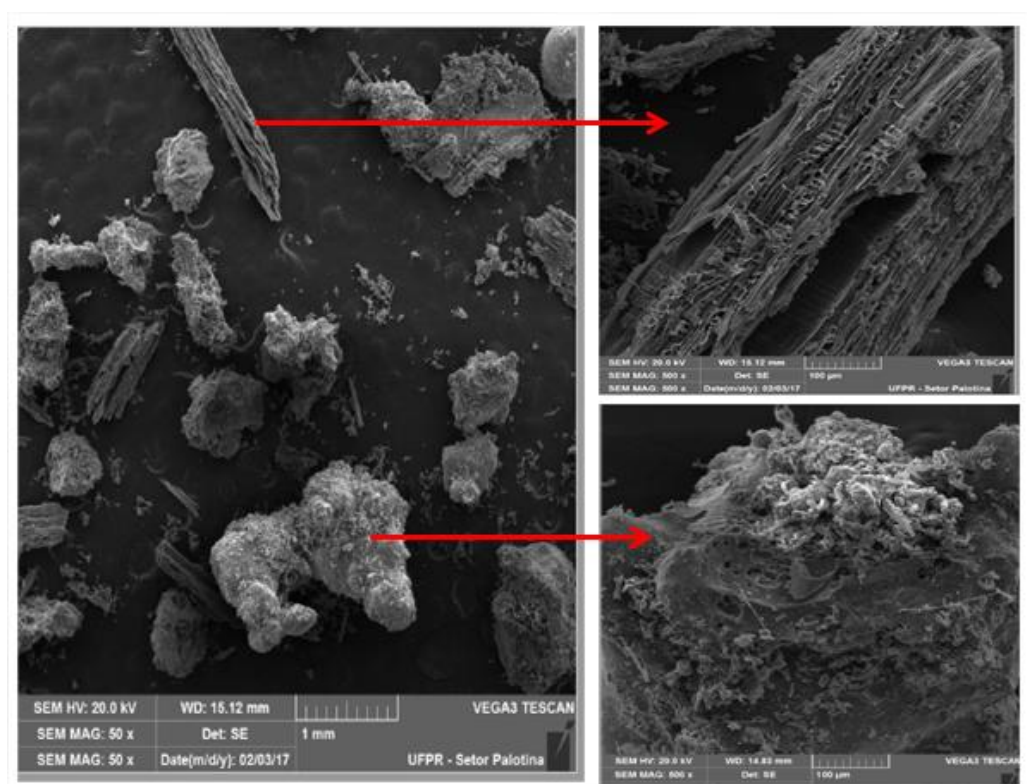
4.4 RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS CINZAS EM MEV/EDS

A morfologia das cinzas coletadas após a combustão dos combustíveis, assim como as partículas retidas no filtro multiciclone são apresentadas a seguir mediante imagens do MEV com ampliações de 50 a 3.000 vezes.

4.4.1 Análises das cinzas provenientes da combustão do cavaco puro

As imagens abaixo demonstram a microestrutura das cinzas provenientes da combustão do cavaco puro em caldeira. Ambas imagens utilizaram detector SE. Cabe ressaltar que as micrografias da esquerda são ampliações de partes da amostra conforme identificado na Figura 30.

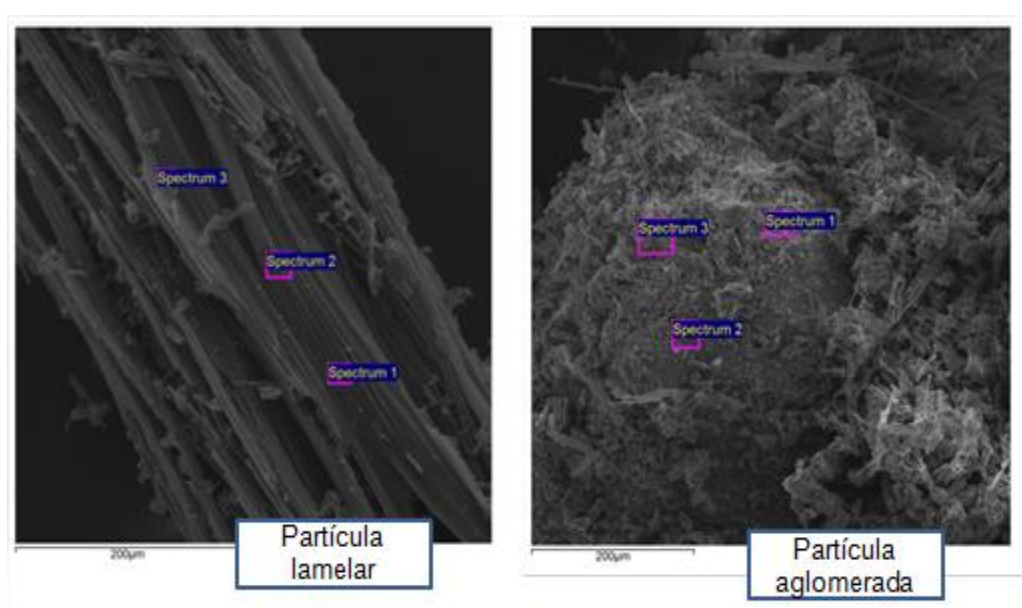
FIGURA 30 – MICROGRAFIA DAS CINZAS PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DO CAVACO OBTIDAS EM MEV



FONTE: A autora (2017).

A imagem apresenta compostos de diferentes formatos e estruturas na mesma amostra. Desta forma foi escolhido um formato lamelar e outro que apresentasse partículas com formato mais arredondados, denominado aglomerado, para serem caracterizados através de EDS, sendo ilustrados na Figura 31.

FIGURA 31 – MICROGRAFIA DA PARTÍCULA LAMELAR E AGLOMERADA DAS CINZAS PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DO CAVACO OBTIDAS EM MEV/EDS



FONTE: A autora (2017).

A Tabela 13 apresenta a caracterização dos elementos presentes nas cinzas, sendo que foram realizadas análises pontuais por EDS em dois pontos com características distintas, sendo caracterizados 3 amostragens em cada partícula.

TABELA 13 – CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS DA AMOSTRA DE CINZAS DE CAVACO POR MEV-EDS

Pontos avaliados	Partícula Lamelar			Partícula Aglomerada		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Elementos	%	%	%	%	%	%
C	89,31	88,76	84,57	20,50	11,24	16,61
O	8,41	8,54	12,53	43,30	38,64	43,99
Na	N.I*	N.I*	N.I*	0,23	0,48	0,27
Mg	0,11	N.I*	0,18	2,12	2,56	3,98
Al	N.I*	N.I*	N.I*	0,66	0,76	0,81
Si	N.I*	N.I*	N.I*	6,38	9,05	4,06
P	N.I*	N.I*	N.I*	0,65	N.I.	0,99
K	1,86	2,05	1,93	8,14	10,00	5,96
Ca	0,31	0,46	0,78	15,32	22,69	19,14
Ti	N.I*	N.I*	N.I*	0,12	0,33	0,27
Mn	N.I*	N.I*	N.I*	0,58	0,91	0,96
Fe	N.I*	N.I*	N.I*	1,99	3,35	2,96
Cu	N.I*	0,20	N.I*	N.I*	N.I*	N.I*

*não identificado.

FONTE: A autora (2017).

Vassilev e colaboradores (2010) afirmam que a biomassa normalmente é rica em umidade, compostos voláteis, Ca, Cl, H, K, Mg, Mn, Na, O, e P e possui menores teores de cinzas, carbono fixo, Al, Fe, N, Si, S, e Ti, quando comparada ao carvão vegetal.

Segundo Nogueira (2011), as cinzas possuem elementos que podem promover ou dificultar o contato entre os gases reagentes e a superfície. Se as cinzas possuírem altos teores de cálcio e magnésio, elas derretem facilmente criando um isolamento na superfície carbonosa. Se tiver alto teor de potássio, a temperatura de fusão aumenta podendo evitar seu derretimento e deixando exposta a superfície carbonácea. Com a combustão do material carbonoso, a partícula vai encolhendo e oxidando os metais formando as cinzas, que se for queimado em aquiescência mantém a mesma forma da biomassa original, mas a menor perturbação se torna pó.

Estudos de Cheng (2003) relatam que o enxofre é oxidado e convertido para SO₂ durante combustão direta, em que uma parte do enxofre pode ser mantida na

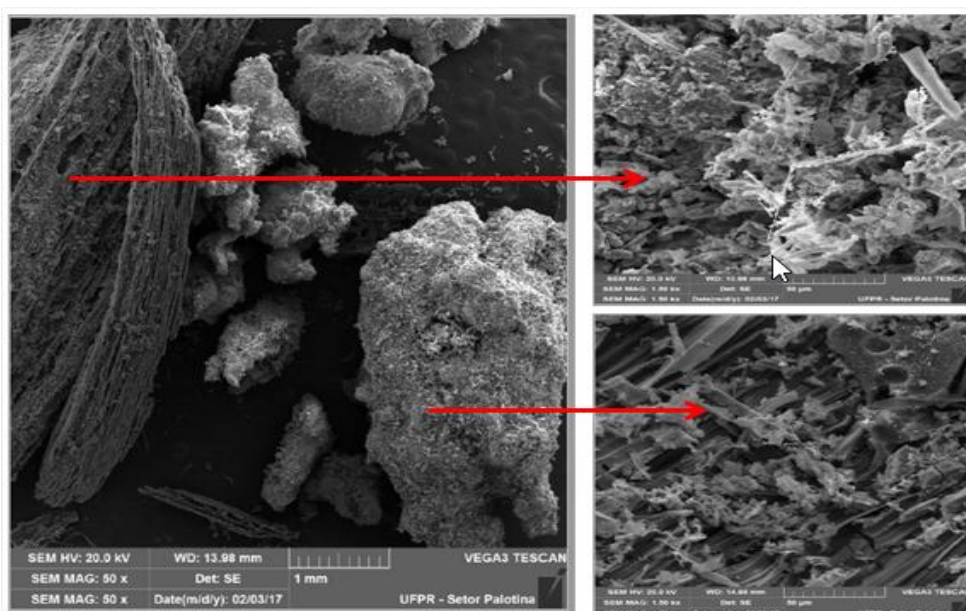
forma inorgânica, devido à contribuição de componentes alcalinos, tais como CaO, MgO, Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , nas cinzas de biomassas.

A tabela 12 demonstra que o % de carbono nas amostras da partícula lamelar é bastante superior comparado com a outra partícula. Em contrapartida na amostra da partícula aglomerada foram identificados os metais Na, Mg, Al, Si, P, Ti, Mn, Fe que não haviam sido identificados na amostra lamelar.

4.4.2 Análises das cinzas provenientes da combustão de lodo adicionado ao cavaco

Semelhante ao item 4.4.1 foram realizadas as micrografias apresentadas nas Figuras 32 e 33 para a amostra de cinzas provenientes da combustão de 10% de lodo adicionado ao cavaco.

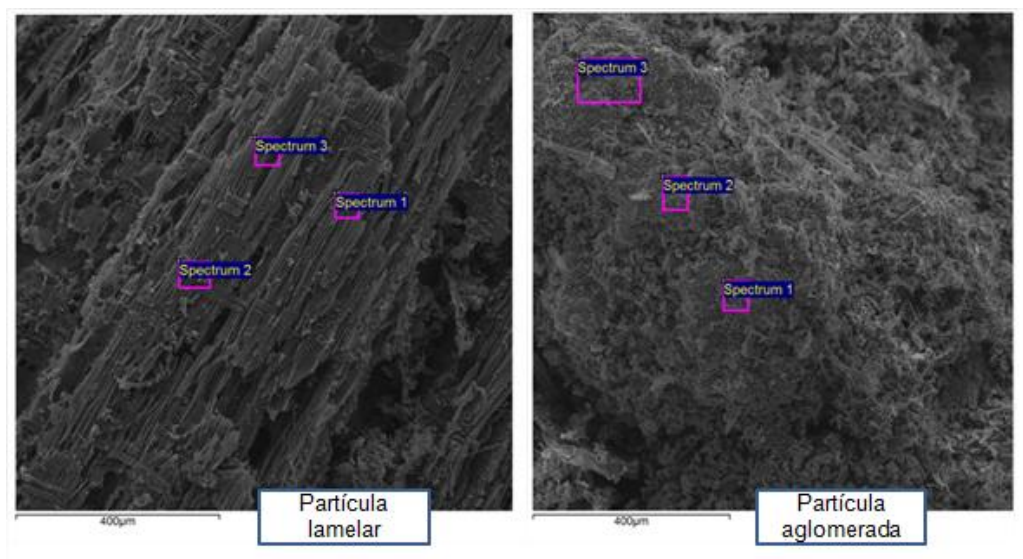
FIGURA 32 – MICROGRAFIA DAS CINZAS PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DO LODO ADICIONADO AO CAVACO OBTIDAS EM MEV



FONTE: A autora (2017).

Com o intuito de analisar os elementos presentes nas cinzas, foram realizadas análises pontuais por EDS em dois pontos com características distintas, sendo caracterizados 3 amostragens em cada partícula.

FIGURA 33 – MICROGRAFIA DAS PARTÍCULAS DAS CINZAS PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DE LODO ADICIONADO AO CAVACO OBTIDAS EM MEV-EDS



FONTE: A autora (2017).

TABELA 14 – CARACTERIZAÇÃO DOS PONTOS INDICADOS NAS PARTÍCULAS DAS CINZAS DE LODO ADICIONADO AO CAVACO POR MEV-EDS

Pontos avaliados	Partícula Lamelar			Partícula Aglomerada		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Elementos	%	%	%	%	%	%
C	89,78	97,69	89,28	26,59	17,71	26,68
O	9,25	N.I*	9,48	37,81	41,75	40,45
Na	N.I*	N.I*	N.I*	0,26	0,20	0,26
Mg	N.I*	0,10	N.I*	4,14	6,00	3,28
Al	N.I*	N.I*	N.I*	0,13	0,32	0,16
Si	N.I*	N.I*	N.I*	0,62	4,12	1,84
P	N.I*	N.I*	N.I*	1,54	1,93	1,42
K	0,90	1,88	1,23	8,92	4,63	7,21
Ca	0,07	0,33	N.I*	16,24	20,24	16,55
Mn	N.I*	N.I*	N.I*	0,42	0,52	0,60
Fe	N.I*	N.I*	N.I*	3,33	2,58	1,56

FONTE: A autora (2017).

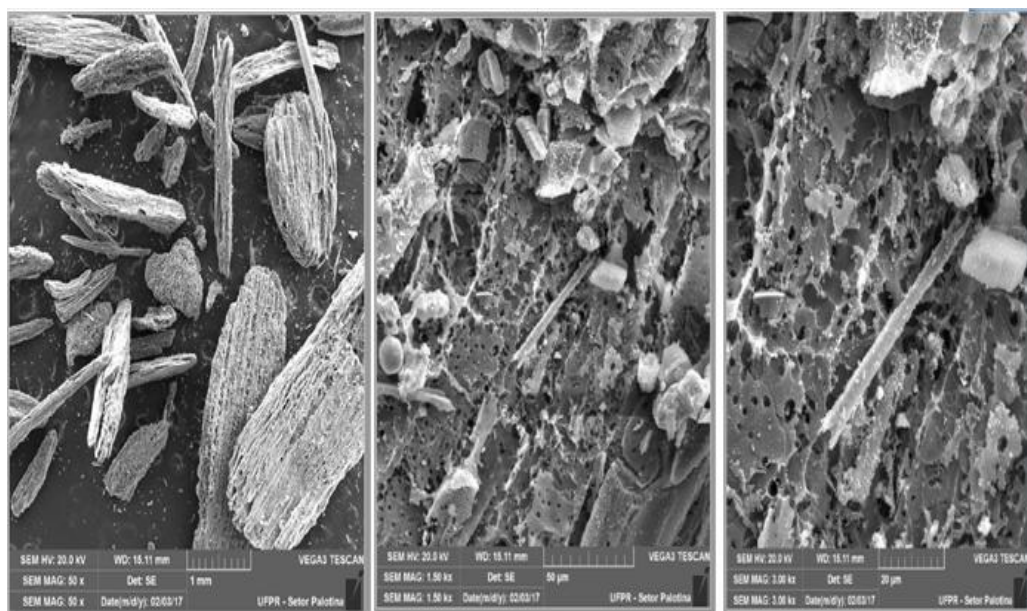
A Tabela 14 apresenta a oscilação no % do elemento carbono entre as amostras, sendo que o % identificado na partícula lamelar é bastante superior

comparado com a outra partícula. Em contrapartida a amostra da partícula aglomerada apresenta os metais Na, Al, Si, P, Mn, Fe que não haviam sido identificados na amostra lamelar. Após os índices dos elementos C e O, os maiores % encontrados na partícula aglomerada foram dos elementos Ca, K, Fe e Mg respectivamente.

4.4.3 Análises das partículas retidas no multiciclone provenientes da combustão de lodo adicionado ao cavaco

Além das análises das cinzas, coletou-se uma amostra das partículas que ficaram retidas no filtro multiciclone, após combustão do lodo adicionado ao cavaco, com o objetivo de caracterizar as partículas em suspensão presentes nos gases de combustão gerados. A micrografia desta amostra se apresenta na Figura 34.

FIGURA 34 – MICROGRAFIA DAS PARTÍCULAS RETIDAS NO MULTICICLONE OBTIDAS EM MEV

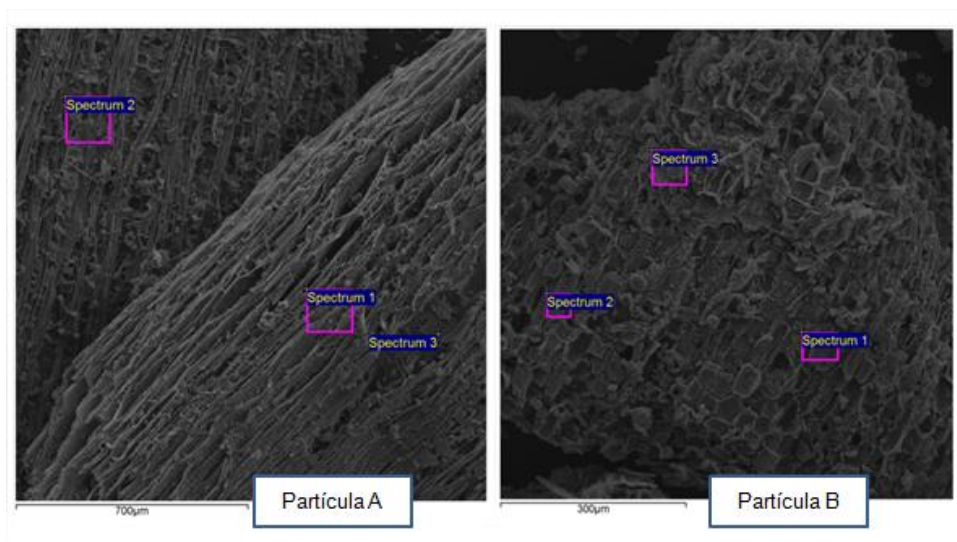


FONTE: A autora (2017).

Evidencia-se na micrografia acima que as partículas são porosas, em formatos diferenciados e possivelmente com capacidade de absorção de elementos presentes nos gases emitidos.

Foram realizadas análises pontuais para a caracterização dos elementos presentes nas partículas amostradas, sendo caracterizados 3 pontos distintos em 2 partículas diferentes. Esta micrografia se apresenta na Figura 35.

FIGURA 35 – IMAGEM DAS PARTÍCULAS RETIDAS NO MULTICICLONE OBTIDAS EM MEV/EDS



FONTE: A autora (2017).

A Tabela 15 apresenta a caracterização das partículas que ficaram retidas no filtro multiciclone após a combustão do lodo adicionado ao combustível principal que é o cavaco.

TABELA 15 – CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS RETIDAS NO MULTICICLONE APÓS COMBUSTÃO DE LODO ADICIONADO AO CAVACO POR MEV/EDS

Pontos avaliados	Partícula A			Partícula B		
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
Elementos	%	%	%	%	%	%
C	76,98	45,82	20,67	62,08	41,84	32,26
O	15,59	12,83	11,47	10,67	4,88	N.I*
Mg	0,16	0,23	N.I*	0,22	0,12	0,17
Al	N.I*	0,20	0,70	0,08	N.I*	N.I*
Si	N.I*	0,55	N.I*	0,15	0,13	N.I*
Cl	0,14	0,42	N.I*	0,34	N.I*	0,35
K	6,01	11,53	56,79	8,59	11,92	15,37
Ca	0,93	16,42	10,36	12,41	26,59	38,05
Ti	N.I*	0,61	N.I*	N.I*	N.I*	N.I*
Mn	N.I*	2,84	N.I*	3,05	6,31	6,92
Fe	0,20	6,86	N.I*	0,92	4,89	3,11
Cu	N.I*	1,70	N.I*	1,49	3,32	3,77

FONTE: A autora (2017).

Evidenciou-se a presença do elemento Cl impregnado nas partículas que ficaram retidas no multiciclone, porém em baixos teores, variando de 0 a 0,42%. Cabe ressaltar que este composto não havia sido identificado nas amostras das cinzas anteriormente citadas.

O elemento Cu também foi identificado em maior quantidade que nas demais amostras, porém com índice máximo de 3,77%.

Além do carbono e oxigênio, os elementos que mais se destacaram em quantidades identificadas foram K e Ca. Estes elementos também estavam presentes nas cinzas avaliadas anteriormente.

4.4.4 Comparação das análises de Fisissorção de N₂

Na tabela 16 estão dispostas as características texturais das amostras das cinzas provenientes da combustão de cavaco, lodo adicionado ao cavaco e partículas do multiciclone.

TABELA 16 – CARACTERIZAÇÃO TEXTURAIS DAS CINZAS E PARTÍCULAS RETIDAS NO MULTICICLONE

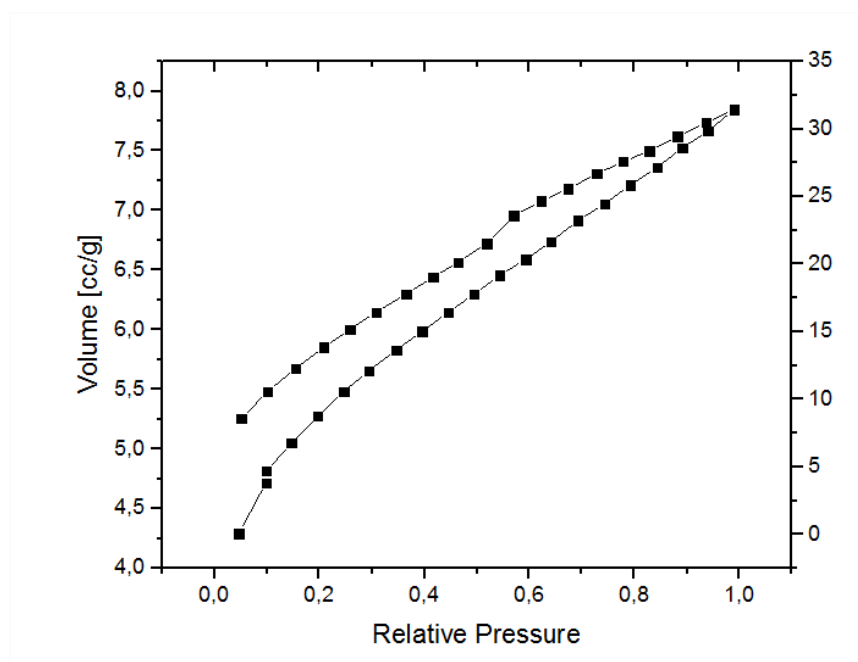
Amostra	S_0 (m ² /g)	V_p (cm ³ /g)	d_p (Å)
Cavaco	17,46	$1,213 \times 10^{-2}$	13,9
Cavaco+Lodo	28,23	$1,814 \times 10^{-2}$	12,85
Multiciclone	179,49	$1,096 \times 10^{-1}$	12,21

FONTE: A autora (2017).

Nota-se pela Tabela 16 que as amostras exibem características mesoporosas. É possível observar que a amostra de cinzas do multiciclone possui uma maior área específica, o que pode estar associado ao maior volume de poros encontrados.

A Figura 36 apresenta a isoterma de adsorção e dessorção da amostra de cinza coletada após a combustão do cavaco em caldeira.

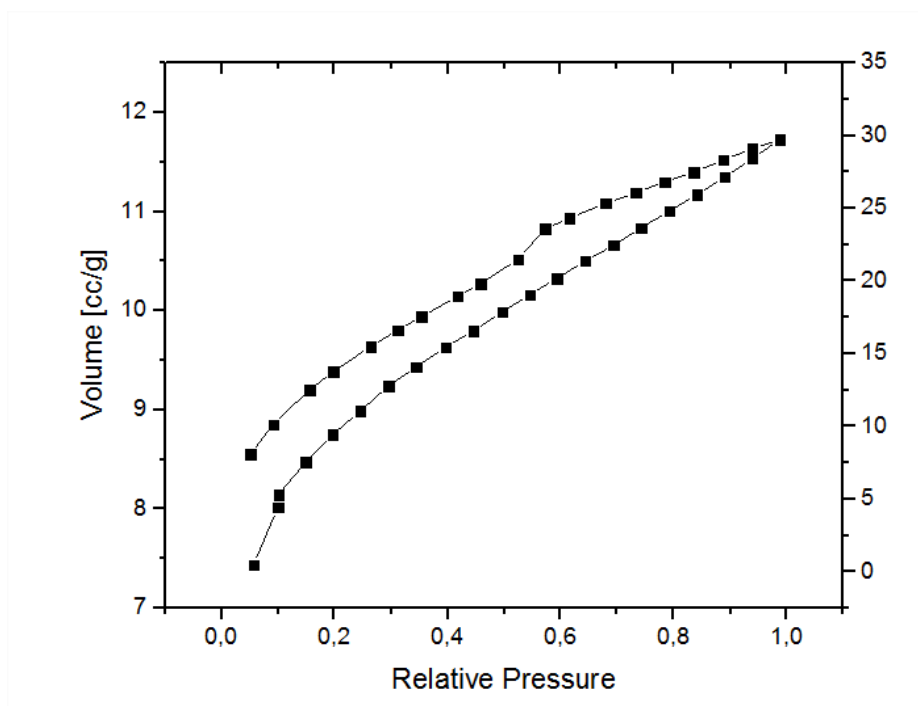
FIGURA 36 – ISOTERMA DE FISISSORÇÃO DE CINZAS DA COMBUSTÃO DO CAVACO



FONTE: A autora (2017).

A Figura 37 apresenta a isoterma de adsorção e dessorção da amostra de cinza coletada após a combustão do lodo adicionado ao cavaco em caldeira.

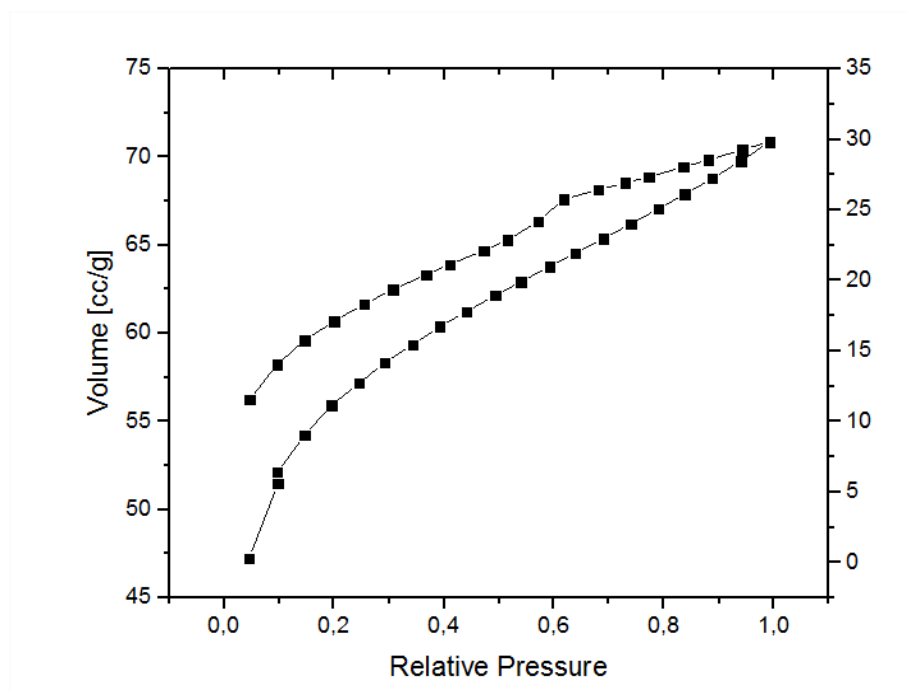
FIGURA 37 – ISOTERMA DE FISISSORÇÃO DE CINZA DA COMBUSTÃO DO LODO ADICIONADO AO CAVACO



FONTE: A autora (2017).

A Figura 38 apresenta a isoterma de adsorção e dessorção da amostra de particulados retidos no filtro multiclone após a combustão do lodo adicionado ao cavaco em caldeira.

FIGURA 38 – ISOTERMA DE FISSORÇÃO DOS PARTICULADOS RETIDOS NO MULTICICLONE APÓS COMBUSTÃO DO LODO ADICIONADO AO CAVACO



FONTE: A autora (2017).

A atividade adsorvente das cinzas ocorre principalmente devido às partículas conhecidas como carbono não queimado (unburned carbon), portanto sua capacidade adsorvente está diretamente ligada à quantidade destas partículas nas cinzas (Cacuro e Waldman, 2015).

Portanto, as cinzas geradas na combustão em caldeira podem ser utilizadas para compostagem, aplicação no solo para correção de nutrientes, ou podem ser utilizadas como adsorventes, conforme apresentado nas Tabelas 15 e 16.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca de novas soluções para o aproveitamento dos resíduos agroindustriais é necessária e deverá ser realizado em curto prazo, devido ao crescimento deste ramo e a elevada quantidade de resíduos gerados.

As alternativas de valorização de resíduos através do seu aproveitamento tem sido muito incentivadas, já que podem contribuir para a redução da poluição ambiental, bem como permitir a valorização econômica desses resíduos tornando-os um subproduto e deste modo agregando valor ao processo de agroindustrialização.

O diferencial deste trabalho foi que além da caracterização realizada entre dois coagulantes utilizados em escala comercial para o sistema de tratamento de efluentes provenientes de abatedouros de aves com graxarias anexas, compararam-se as características do lodo gerado após o sistema de flotação e centrifugação e realizou-se a queima em escala industrial do lodo I, realizando um acompanhamento do comportamento térmico do equipamento de combustão e a avaliação dos gases gerados, teste que ocorreu durante o processo produtivo da indústria. Na literatura avaliada não foi encontrado estudos realizados nas condições supracitadas, sendo que foi identificado apenas testes de bancada com lodo seco em secador rotativo, com aproximadamente 15% de umidade.

Após a caracterização dos dois tipos de lodos gerados com diferentes coagulantes, e da realização da análise imediata e elementar da mistura do lodo com o cavaco em diferentes %, foi possível avaliar os compostos presentes para utilização destes materiais como fontes de energia.

Evidenciou-se que ambos os lodos testados foram caracterizados como Classe II-A. Desta forma após a combustão em caldeira, as cinzas geradas podem ser reutilizadas para diversos fins.

A análise térmica diferencial evidenciou-se as alterações nas temperaturas de queima das amostras com diferentes percentuais de lodo adicionado ao cavaco, e as reações endotérmicas e exotérmicas.

Optou-se pela realização do teste em escala industrial no Abatedouro I, que utiliza como coagulante no sistema de tratamento de efluentes o cloreto férrico, com o objetivo de identificar a viabilidade do uso deste material como combustível secundário. Cabe ressaltar que foi identificada na composição deste lodo a presença de alguns metais, e por este motivo a mistura in loco foi realizada na proporção de

10% de lodo juntamente com o cavaco, de forma a aumentar a concentração dos gases emitidos durante a combustão desta mistura. Com este percentual de mistura, a umidade de 65% do lodo também não interfere na queima.

Embora os resultados experimentais tenham mostrado que quanto maior a adição de Lodo na amostra maior é o incremento do PCS, no teste realizado no abatedouro I, evidenciou-se que com a adição do lodo na esteira de alimentação de cavaco para combustão em caldeira, a pressão da caldeira apresentou melhor estabilidade, comparado com a combustão do cavaco puro. Com a mistura de 10% de lodo ao cavaco, verificou-se também uma redução da velocidade da rosca de alimentação de combustível, o que significa a diminuição do combustível principal (cavaco) durante o período de teste

Devido ao alto teor de oxigênio presente no interior do equipamento os resultados de emissões atmosféricas da combustão tanto do cavaco puro como do lodo I, que utiliza como coagulante o cloreto férrico ficaram maiores que o padrão de lançamento conforme Resolução SEMA 016/2014. Porém observa-se que foi uma condição pontual devido ao excesso de chuvas no período do teste e a falta de cobertura para ambos os combustíveis.

Através da análise das cinzas em MEV-EDS, evidenciou-se que parte dos elementos gerados na combustão são adsorvidos nas partículas retidas no filtro multiciclone. E as cinzas geradas após a combustão com o lodo apresentaram elementos similares das cinzas geradas com a combustão do cavaco puro. Cabe ressaltar que as cinzas geradas na combustão podem ser utilizadas para o uso na agricultura como fonte de nutrientes e correção de pH do solo, devido a presença de carbono, cálcio, potássio e ferro.

O aproveitamento do lodo gerado no sistema de tratamento de efluentes na própria planta, evita riscos de impactos ambientais causados pelo transporte e armazenagem inadequada do mesmo no meio ambiente. Além disso, com o aproveitamento interno no caso do Abatedouro I, possibilita um ganho financeiro mensal de aproximadamente R\$ 50.000, valor este pago para a coleta e compostagem desse material juntamente com outros materiais orgânicos.

Portanto com o aproveitamento de todo o lodo gerado em combustão em conjunto com combustível principal, pode gerar uma economia na ordem de R\$600.000 reais no ano para a empresa. Sendo que este valor pode ser incrementado, pois durante os testes foi possível observar uma redução na

quantidade de cavaco utilizado, porém não foi possível quantificar exatamente este volume.

Não foi realizado teste in loco com a queima do lodo II, que utiliza o coagulante orgânico, devido ao mesmo já possuir uma destinação apropriada para empresa. Porém estima-se que este é um material mais nobre, onde evidenciou-se na caracterização deste material valores extremamente baixos para os metais pesados caracterizados. Na comparação com os valores estipulados pela Resolução SEMA 042/2008, somente o elemento Níquel não atendeu o padrão estabelecido. O poder calorífico superior deste lodo foi 32,16% maior que o valor obtido para o cavaco analisado. Através dos dados identificados, estima-se melhores resultados na combustão com este material. A única desvantagem seria o custo do tratamento de efluentes, pois este coagulante possui um custo 40% maior quando comparado com o valor do tratamento de efluentes com o cloreto férrico.

Sugere-se em trabalhos posteriores a realização de teste de queima de lodo gerado com a utilização do coagulante orgânico, e também a repetição do teste de combustão com o lodo gerado com o cloreto férrico com um maior % de mistura de lodo adicionado ao cavaco, e também a realização de análises de outros gases que não foram escopo deste trabalho, tais como a presença de compostos fenólicos, ácidos carboxílicos, estireno, Pah, dioxinas e furanos, assim como os gases já avaliados neste trabalho porém em condições de queima mais controladas.

Essa situação deve ser estudada de forma mais aprofundada, através de estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental de várias alternativas, como as formas de tratamento dos gases ou outras formas menos poluentes de reaproveitamento.

Foi considerado neste trabalho a combustão para aproveitamento térmico. Sugere-se também outras formas de aproveitamento térmico deste material, tais como a fabricação de pellets, briquetes, além de avaliar a necessidade da secagem deste material para uso em caldeira. Pode-se também avaliar processos de co-geração de energia através da combustão deste lodo adicionado a cavaco ou outros tipos de biomassas residuais.

Cabe ressaltar que não foi avaliado a possibilidade de incrustações e /ou corrosão causado no corpo da caldeira. Portanto não é possível identificar se haverá alterações no tempo de vida útil deste equipamento. Esta situação poderá ser avaliada em trabalhos futuros.

Além dos benefícios já citados anteriormente, a combustão deste lodo em conjunto com o cavaco reduz custos com transporte e movimentação, evita riscos de possíveis passivos ambientais causados por terceiros devido ao transporte e destinação final, reduz o uso de combustível principal (cavaco) e estimula a utilização de biocombustíveis gerados a partir da biomassa residual na própria unidade industrial, contribuindo, portanto para a sustentabilidade da cadeia avícola.

REFERÊNCIAS

ABPA. Associação Brasileira de Proteína Animal. **Avicultura Brasileira: Sustentabilidade.** Disponível em <http://www.ubabef.com.br/a_avicultura_brasileira/sustentabilidade>. Acesso em Mai de 2016.

ABPA. Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório Anual 2016.** Disponível em: <http://abpabr.com.br/storage/files/versao_final_para_envio_digital_1925a_final_abp_a_relatorio_anual_2016_portugues_web1.pdf>. Acesso em 20 Jan. 2017.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004:2004. Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro. 2004. 71 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10005:2004. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro. 2004. 20p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10006:2004. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro. 2004. 7 p.

ABNT NBR ISO/IEC 17025. **Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaios e de medição.** 2 ed. São Paulo: ABNT, 2005.

ALMEIDA FILHO, F. de. **Monitoramento e controle de emissão de material particulado em uma fonte estacionária.** 2008. 133 f. Dissertação Mestrado em Engenharia Química. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2008.

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** 3ª. ed. 2008. Disponível em:< http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em Julho 2016.

APHA. American Public Health Association. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.** American Water Works Association, Water Environmental Federation. Washington. 22th Edition, 2012.

ARRUDA, M. Z. de. **Análise de combustíveis de caldeiras**. TCC Engenharia Ambiental Universidade Passo Fundo. 2009. 74 p.

ASTM. D3176. **Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke**, 1989.

ASTM. D2015. **Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter**, 2000.

ASTM D 4239-08. **Standart Test Methods for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High Temperature Tube Furnace Combustion method**.1999.

ASTM. D5373-02. **Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal and Coke**, 2002.

ASTM. E1131. **Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry**, 2003.

AZZOLINI, J.C.; ZARDO, F. **Tratamento de Águas**. Joaçaba, 2010. 156 p. Apostila.

BAE, Y. H.; KIM, H. J.; LEE, E. J.; SUNG, N. C.; LEE, S. S.; KIM, Y. H. **Potable water treatment by polyacrylamide base flocculants, couple with an inorganic coagulant**. Department of Chemical Engineering, Dong-A University, Busan, Corea do Sul, 2007

BATISTELLA, L. **Avaliação das emissões gasosas geradas na combustão de lodo de esgoto sanitário em combustor de leito móvel**. Florianópolis, SC, 2015. 168 p. Tese doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 2015.

BELUSSO, D. **A evolução da avicultura industrial Brasileira e seus efeitos territoriais**. Revista Percurso - NEMO Maringá, v. 2, n. 1, p. 25-51, 2010.

BIAGINI, E.; LIPPI, F.; PETARCA, L.; TOGNOTTI, L. **Devolatilization rate of biomass and coal-biomass blends: an experimental investigation**. Fuel 81, p.1041-1050, 2002.

BIZZO, Waldir A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Unicamp. cap, v. 2, p. 18-40, 2003.

BORGES, A. C. P. **Caracterização Energética do Cavaco de *Eucalyptus grandis* "in natura" e torrefeito**. Salvador, 2015. 80 p. Dissertação mestrado Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2015.

BORK, J. A. **Caracterização e avaliação das emissões do uso de lodo sanitário seco como combustível em combustor ciclônico**. Florianópolis, 2011. 113f. Dissertação Mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal de Santa Catarina.

BRÁS, A. M.; MIRANDA, F.; HIPÓLITO, L.; DIAS, L. S. **Biomassa e produção de energia**. 2008. Disponível em:<<http://www.portalipvc.pt/images/ipvc/esa/pdf/biomassa.pdf>> Acesso em 13 Jun de 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional 2030**. Ministério de Minas Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília: MME: EPE, 2007. p. 254.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002**. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006**. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 436/2011**, estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, onde os limites são fixados por poluente e por tipologia de fonte. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

BRASIL. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hidricos do Paraná. **Resolução SEMA nº 042/2008**. Estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras e dá outras providências.

BRASIL. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hidricos do Paraná. **Resolução SEMA nº 016/2014**. Define critérios para o Controle da Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade de vida.

BRASIL Ministério do Trabalho e Emprego. **NR13. Caldeiras e Vasos de Pressão**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego. 1978. Disponível em: <http://www.segurancanotrabalho.eng.br/nr/nr_13.pdf>. Acesso em 12 Set. 2016.

BRITO, J. O., **Madeira para a Floresta: a Verdadeira Realidade do Uso de Recursos Florestais**. Silvicultura v.11, n.41, p.188-193, 1986.

BRITO, J. O., **Princípios de Produção e Utilização de Carvão Vegetal de Madeira**. Documentos Florestais. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1990.

CACURO, T. A.; WaALDMAN, W. R. **Cinzas da Queima de Biomassa: Aplicações e Potencialidades**. Revista Virtual Química. Vol 7. Nº. 6. 2154-2165. 2015.

CARVALHO JÚNIOR, J. A., LAVACA. P. T. **Emissões em Processos de Combustão**, Editora UNESP, 2003.

CARVALHO JÚNIOR, J. A., McQUAY, M. Q. **Princípios de Combustão Aplicada**, Editora da UFSC, 2007.

CHAGGER, H.K.; KENDALL, A.; MCDONALD, A.; POURKASHANIAN, M.; WILLIAMS, A. (1998). **Formation of dioxins and other semi-volatile organic compounds in biomass combustion**. Applied Energy 60, p. 101-114.

CORTEZ, L.A.B; LORA, E.E.S.; GOMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. 2008. Campinas/SP. Editora da UNICAMP, 2008.

CHENG, J., ZHOU, J.; LIU, J.; ZHOU, Z.; HUANG, Z.; XINYU, C.; ZHAO, X.; CEN, K.. **Sulfur removal at high temperature during coal combustion in furnaces: a review**. Progress in Energy and Combustion Science 29, n. 5 . 2003.

DEDAVID, A. B; GOMES, C.I; MACHADO, G; **Microscopia Eletrônica de Varredura. Aplicações e preparação de amostras Aplicações e preparação de**

amostras. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. Disponível em:<<http://www.pucrs.br/edipucrs/online/microscopia.pdf>>. Acesso em Janeiro 2017.

DENARI, G.B.; CAVALHEIRO, E. T.G. **Princípios e aplicações de análise térmica.** São Carlos: IQSC, 2012. 40p.

DEMIRBAS, A. **Combustion characteristics of different biomass fuels. Progress in energy and combustion science.** Turquia: Elsevier, v. 30, p. 219-230, 2004.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** ABES, v.1, Rio de Janeiro. 1993.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; **Métodos e técnicas de tratamento de água.** v.1. São Carlos: RIMA, 2005.

EPA. Environmental Protection Agency. **40 CFR Part 50 National Ambient - Air Quality Standards for Particulate Matter; Final Rule.** Disponível em:<<https://www3.epa.gov/ttn/naaqs/standards/pm/data/fr20061017.pdf>>. Acesso em 11 Jan. 2017.

EPA- Environmental Protection Agency. **Guidelines for Air Emission Regulation N. 1/2002.** Limitation of air pollution from installations, 2002.

ELETROBRAS- Centrais Elétricas Brasileiras/ PROCEL-Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Eficiência Energética no Uso de Vapor.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

EPE- Empresa de pesquisa energética. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). Rio de Janeiro, 2016. Disponível em:<<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20%20Online%2016maio2016.pdf>> . Acesso em 10 Jan. 2017.

EQMA Engenharia e Consultoria. Disponível em:<<http://www.revistatae.com.br/noticiaInt.asp?id=5804>>. Acesso em 15 Jan. 2017.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). EPE:

Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20%20Online%2016maio2016.pdf>>. Acesso em Janeiro 2017.

FEAM - Fundação Estadual de Meio Ambiente / FIEMG - Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Laticínios**. 2014. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_laticinios.pdf> . Acesso em 16 Out. 2016.

FELDER, C.; AZZOLINI, J. C.; **Estudo de viabilidade de queima de resíduos originários da indústria de laticínio**. Unoesc & Ciência-ACET, v. 4, n. 1, p. 71-84, 2013. Disponível em: <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/2446-9603-1-PB%20(6).pdf>. Acesso em 23 Out. 2016.

FLORIANI, S. L. **Potencial de resíduos sólidos industriais como fonte de energia e avaliação das emissões gasosas em combustão em escala piloto**. 2007. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

FLOTTWEG. **Tridecanter centrífugo**. 2009. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=uvWcLZWM_JYI> . Acesso em 05 Set 2016.

FRANCISCO, R. P. **Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balanços de energia**. Dissertação mestrado. Universidade Federal de São João del Rei. Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. 2012.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2002.

GHANDI, G. **Tratamento e controle de efluentes industriais**. P.5-46. 2005.

GONÇALVES, J. E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis**. Botucatu, 2010. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2010.

GOMES, P. A. **Teoria da Carbonização da Madeira**, In:Uso da Madeira para fins Energéticos, Publicação Fundação centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, v.1., p. 27-42, Belo horizonte, 1980.

HEIKKINEN, J.M.; HORDIJK, J.C.; DE JONG, W.; SPLIETHOFF, H. **Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 71, p.883-900, 2004.

IONASHIRO, M. G. **Fundamentos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial/Calorimetria Exploratória Diferencial**. São Paulo: Giz, v. 1, p. 80, 2005.

JINDAROM, C., MEEYOO, V., RIRKSOMBOON,T., RANGSUNVIGIT, P. **Surface characterization and dye adsorptive capacities of char obtained from pyrolysis/gasification of sewage sludge**. Chem. Eng. J., v. 133, n.1-3, p. 239-246, 2007.

JOHN, W., BUCKLEY, C. A., JACOBS, E. P., SANDERSON, R.D. **Synthesis and use of PolyDADMAC for water purification**. In:Water Research Commission (WRC), Biennial Conference of the Water Institute of Southern Africa (WISA), Durban, South Africa. 2002. p. 19-23.

JUNIOR, C. B.; LIBÂNIO, C. C.; GALINKINM, M.; OLIVEIRA, M. M. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**. 2 ed. Editora Technopolitik. Foz do Iguaçu, 2009, 140 p.

KAMPMAN, B.E.; CROEZEN, H.J.; KEIZER, I.DE.; BELLO, O. Biomass: taken of stoken? In: HEIKKINEN, J.M.; HORDIJK, J.C.; DE JONG, W.; SPLIETHOFF, H. **Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 71, p.883-900, 2004.

KRIEGER, E. I. F. **Avaliação do Consumo de Água, racionalização do uso e reuso do efluente líquido de frigorífico de suínas na busca sustentabilidade socioambiental da empresa**. Tese de doutorado do Instituto de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

LAMMERS, H. B., LAMMERS, T. G., WOODRUFF, E. B. **Steam Plant Operation**, 8ª edição, MCGRAW-HILL, 2004.

LEVINE, D. A. & ASANO. **Water Reclamation, recycling and reuse in industry. In: Water recycling and resource recovery in industry: Analysis, technologies and implementation.** IWA Publishing, 2002.

LOPES, J.C.O. **Técnico em Agropecuária - Avicultura.** Colégio Agrícola de Floriano, órgão vinculado a Universidade Federal do Piauí (UFPI), e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)– e -Tec Brasil. 2011.

LUCON, O. dos S. **Modelo Horus inventário de emissões de poluentes atmosféricos pela queima de combustíveis em indústrias no estado de São Paulo.** 2003. Tese em Energia. Escola Politécnica, Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo. 2003.

McKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 1): overview of biomass.** Bioresource Technology. Elsevier. v. 83. p. 37-46, 2002.

MACEDO, J. C. F. **Análise Térmica e ambiental da queima do lodo primário da Fabricação de papel e celulose em caldeira de biomassa a grelha.** Dissertação de mestrado Eng. Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, MG. 2006.

MULLER, M.; VILLALBA, J.C.; ANAISSI, F. J. **Decomposição térmica (TG-DTA) de sais de ferro [FeCl₃.6H₂O] e [Fe(NO₃)₃.9H₂O] com análise morfológica e química do produto final.** Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 35, n. 1, p. 9-14, jan./jun. 2014.

NDIEMA, C. K. W.; MPENDAZOE, F. M.; WILLIAMS, A. **Emission of pollutants from a biomass stove.** Energy Conversion Management, v. 39, p. 1357-1367, 1998.

NOGUEIRA, L.A.H e LORA, E.E.S. **Dendoenergia: fundamentos e aplicações.** 2ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

NOGUEIRA, M. F. M; HUMBERTO, J. J. **Capítulo III: Combustão de Biomassa sólida.** Combustão de Resíduos em Energia. III Escola de Combustão. Salvador, 4 a 8 de Julho de 2011.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BÄRNTHALER, G. **Chemical properties of solid biofuels – significance and impact.** Biomass & Bioenergy, v.30, p. 973-982, 2006.

OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semi-árido nordestino**. 2003. 149f. Tese Doutorado em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

PACHECO, J. W. **Guia técnico ambiental de frigoríficos - Industrialização de carnes (Bovina e Suína)** – Série P+L. São Paulo: CETESB, 2006.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor e turbidez elevada**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2001.

PEREIRA, B. L. C., CARNEIRO, A. D. C. O., CARVALHO, A. M. M. L., TRUGILHO, P. F., MELO, I. C. N. A., & OLIVEIRA, A. C. **Estudo da degradação térmica da madeira de Eucalyptus através de termogravimetria e calorimetria**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.37, n.3, p.567-576, 2013.

PINTO, E. M. **Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal à grã para o Eucalyptus citriodora e Eucalyptus grandis**. 2005. Tese (Doutorado) – Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PINTO, E. M.; CALIL JÚNIOR, C. **Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo**. Revista Minerva, v3,n2, p. 131-140. 2006. Disponível em: <[http://www.fipai.org.br/Minerva%2003\(02\)%2001.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2003(02)%2001.pdf)> . Acesso em Janeiro 2017.

RAVINDRA, K.; SOKHI, R.; GRIEKEN, R. V. **Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation**. Atmospheric Environment, v. 42, n. 13, p. 2895-2921, 2008.

RENDEIRO, G., NOGUEIRA, M. **Combustão e Gaseificação de Biomassa Sólida**. Soluções energéticas para a Amazônia. 1.ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 193p.

RIBEIRO, A. P. R. A. **Influência da qualidade do carvão e das condições operacionais no processo de combustão de uma usina termelétrica**. 2002. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

SAMPAIO, Z. L. M. **Análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar de variedades SP911049, RB92579 E SP816949.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.

SCHOENHALS, M. **Avaliação da eficiência do processo de flotação aplicado ao tratamento primário de efluentes de abatedouro avícola.** 87 f. Dissertação Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006.

SENA, R.F. **Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia.** Dissertação Mestrado Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2005.

SENA, R. F.; CLAUDINO, A.; MORETTI, K.; BONFANTI, I. C.; MOREIRA, R. F. P. M.; JOSÉ, H. J. **Biofuel application of biomass obtained from a meat industry wastewater plant through the flotation process—A case study.** Resources Conservation and Recycling (2007), doi:10.1016/j.resconrec.2007.07.002.

SILVA, L.C.; SARCINELLI, M.F.; VENTURINI, K.S. **Abate de Aves.** Universidade Federal do Espírito Santo. UFES. Programa Institucional de Extensão. Boletim Técnico PIE/UFES:00607. 2007.

SILVA, C. L.; SAES, M. S. M. **Estruturas e características da cadeia de valor a partir do tipo de governança: uma avaliação preliminar da avicultura de corte paranaense.** Informe Gepec, Toledo/ PR, v. 9, n. 1, 2005.

SINDIAVIPAR. Sindicato das Indústrias de Produtos Avícolas do Estado do Paraná. **Estatísticas - Frango.** 2016. Disponível em: <https://www.sindiavipar.com.br/index.php?modulo=8&acao=detalhe&cod=1001>>. Acesso em 20 Jan. 2017.

SIMONEIT, B. R. T. **Biomass burning –a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion.** Appl. Geochem., v. 17, p.129-162, 2002.

SOARES, R.V. **Queimas Controladas: Prós e Contras.** Anais/IPEF: 6-10, abril, 1995.

TARNAWSKI, W. **Emissions Factors for Combustion of Biomass Fuels in the Pulp and Paper Mills**. Fibers & Textiles in Eastern Europe. University of Lodz, Poland, p. 91-97. Outubro/2004.

TEIXEIRA, F. N., LORA, E. E. S., **Suprimento Energético para Termelétricas**, in: Geração Termelétrica: planejamento, projeto e operação, Coordenadores: Lora, E.E.S.; Nascimento, M.A.R., Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2004.

TESSARO, A. A. **Potencial energético da cama de aviário produzida na região Sudoeste do Paraná utilizada como substrato para a produção de biogás**. Dissertação Mestrado em Desenvolvimento da Tecnologia– LACTEC, Curitiba, 2011.

TOLEDO, J. C. **Gestão da qualidade na agroindústria**. In: BATALHA, M. O. (Orgs.). Gestão agroindustrial. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2001.

TOMBOLO, G.A.; DALLA COSTA, J. **Cooperativas na avicultura de corte Paranaense**. 2011. Disponível em:<http://www.pet-economia.ufpr.br/banco_de_arquivos/00005_COOPERATIVAS_NA_AVICULTURA_DE_CORTE_PARANAENSE.pdf>. Acesso em 10 Jan. 2017.

USEPA-United States Environmental Protection Agency. **Hazardous Waste Incineration Measurement Guidance Manual**. Volume III of the Hazardous Waste Incineration Guidance Series. Washington, DC: Technology Transfer. EPA/625/6-89/021, 1989.

USEPA-United States Environmental Protection Agency. **Technology Transfer Network Emission Measurement Center – EMC**. Disponível em:<<http://www.epa.gov/ttn/emc>>. Acesso em 23 Out. 2016.

USEPA-United States Environmental Protection Agency. **SW 846 - Test methods for evaluating solid waste; Physical/Chemical methods**. Disponível em:<<https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-compendium>>. Acesso em 10 Fev. 2017.

UE- União Européia. **Diretiva UE 2015/2193 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de novembro de 2015**. Relativa à limitação das emissões para a atmosfera de certos poluentes provenientes de médias instalações de combustão (Texto relevante para efeitos do EEE). Disponível em: < <http://eur-lex.europa.eu/legal-ontent/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32015L2193>>. Acesso em 11 Jan. 2017.

VASSILEV, S. V., BAXTER, D. ANDERSEN, L.K., VASSILEVA, C.G. **An overview of the chemical composition of biomass.** Fuel, London, v. 89, n. 5, p. 913-933, May 2010.

VILELA, A. de O. **Desenvolvimento e validação técnica, de um forno industria de carbonização, modelo container 2ª geração.** Tese de doutorado. 2014. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG- UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. 372 p. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/537M.PDF>> Acesso em Janeiro/2017.

VIRMOND, E. **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia.** Dissertação de Mestrado Engenharia Química Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2007.

VÓLIA, M.; TRICHES, D. **A cadeia da carne de frango: uma análise de mercados brasileiros e mundial de 2002 a 2010.** Instituto de pesquisa de Ciências Sociais. Caxias do Sul, 2013.

WAKEMAN, R. J.; TARLETON, E. S. (1999). **Filtration: equipment selection, modeling and process simulation.** Elsevier Science. New York. p. 446.

WILLIAMS, A.; JONES, J. M.; MA, L.; POURKASHANIAN, M. **Pollutants from the combustion of solid biomass fuels.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 38, n. 2, p. 113-137, 2012.

ZHENG, G.; KOZIN´SKI, J. A. **Thermal events occurring during the combustion of biomass residue.** Fuel, v. 79, n. 2 , p. 181-192, 2000.

APÊNDICE A – RESULTADOS ANÁLISES NBR 10.005:2004

QUADRO 7 – NBR 10005:2004 – LIXIVIADO – PARÂMETROS INORGÂNICOS

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos				
Parâmetro	Unidade	Lodo I (Cloreto Férrico)	Lodo II (Coagulante Orgânico)	VMP NBR 10.004:2004
Arsênio	mg/L	< 0,01	< 0,01	1
Bário	mg/L	< 0,01	0,0847	70
Cádmio	mg/L	< 0,001	<0,001	0,5
Chumbo	mg/L	< 0,01	< 0,01	1
Cromo	mg/L	< 0,01	< 0,01	5
Fluoreto	mg/L	< 0,1	0,3	150
Mercúrio	mg/L	< 0,00008	< 0,00008	0,1
Prata	mg/L	< 0,01	< 0,01	5
Selênio	mg/L	< 0,008	< 0,008	1

FONTE: A autora (2017).

QUADRO 8 – NBR 10005:2004 – PARÂMETROS DE LIXIVIAÇÃO

Parâmetro	Unidade	Lodo I (Cloreto Férrico)	Lodo II (Coagulante Orgânico)	VMP NBR 10.004:2004
Tempo de Lixiviação	horas	18	18	16 - 20
pH Final do Lixiviado		5,6	5,3	

FONTE: A autora (2017).

QUADRO 9 – NBR 10005:2004 – LIXIVIADO – PARÂMETROS ORGÂNICOS

Parâmetro	Unidade	Lodo I (Cloreto Férrico)	Lodo II (Coagulante Orgânico)	VMP NBR 10.004:2004
Dicloroeteno	mg/L	< 0,001	< 0,001	3
1,2-Dicloroetano	mg/L	< 0,001	< 0,001	1
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	< 0,001	< 0,001	7,5
2,4,5-T	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	0,2
2,4,5-TP	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	1
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	400
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	20
2,4-D mg/L	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	3
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	0,13
Aldrin + Dieldrin	mg/L	< 0,00003	< 0,00003	0,003
Benzeno	mg/L	< 0,001	< 0,001	0,5
Benzo(a)pireno	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	0,07
Clordano (isômeros)	mg/L	< 0,00003	< 0,00003	0,02
Cloreto de Vinila	mg/L	< 0,001	< 0,001	0,5
Clorobenzeno	mg/L	< 0,001	< 0,001	100
Clorofórmio	mg/L	< 0,001	< 0,001	6
DDT (isômeros)	mg/L	< 0,00001	< 0,00001	0,2
Endrin	mg/L	< 0,00003	< 0,00003	0,06
Hexaclorobenzeno	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	< 0,00001	< 0,00001	0,5
Hexacloroetano	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	3
3+4-Metilfenol (m+p-Cresol)	mg/L	< 0,0001	0,211	200
Metoxicloro	mg/L	< 0,00003	< 0,00003	2
Nitrobenzeno	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	2
2-Metilfenol (o-Cresol)	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	200
Pentaclorofenol	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	0,9
Piridina	mg/L	< 2,5	< 2,5	5
Tetracloroeto de Carbono	mg/L	< 0,001	< 0,001	0,2
Tetracloroeteno	mg/L	< 0,001	< 0,001	4
Toxafeno	mg/L	< 0,0001	< 0,0001	0,5
Tricloroeteno	mg/L	< 0,001	< 0,001	7
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	< 0,00002	< 0,00002	0,003
Lindano (g-BHC)	mg/L	< 0,00003	< 0,00003	0,2
Metiletilcetona	mg/L	< 2,5	< 2,5	200

APÊNDICE B – RESULTADOS ANÁLISES NBR 10.006:2004

QUADRO 10 – NBR 10006:2004 – EXTRATO SOLUBILIZADO –
PARÂMETROS INORGÂNICOS

Parâmetro	Unidade	Lodo I (Cloreto Férrico)	Lodo II (Coagulante Orgânico)	VMP NBR 10.004:2004
Alumínio	mg/L	< 0,01	0,0171	0,2
Arsênio	mg/L	< 0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	< 0,01	0,0453	0,7
Cádmio	mg/L	< 0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	< 0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	< 0,05	< 0,05	0,07
Cloreto	mg/L	16	11,9	250
Cobre	mg/L	0,0106	<0,005	2
Cromo	mg/L	< 0,01	< 0,01	0,05
Ferro	mg/L	17,8	1,82	0,3
Fluoreto	mg/L	< 0,1	< 0,1	1,5
Índice de Fenóis	mg/L	0,49	0,12	0,01
Manganês	mg/L	0,397	0,268	0,1
Mercurio	mg/L	< 0,00008	< 0,00008	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	< 1	< 1	10
Prata	mg/L	< 0,01	< 0,01	0,05
Selênio	mg/L	< 0,008	< 0,008	0,01
Sódio	mg/L	12	9,76	200
Sulfato	mg/L	< 5	< 5	250
Surfactantes	mg/L	0,15	< 1	0,5
Zinco	mg/L	0,0365	0,602	5

FONTE: A autora (2017).

**QUADRO 11 – NBR 10006:2004 – EXTRATO SOLUBILIZADO –
PARÂMETROS ORGÂNICOS**

Parâmetro	Unidade	Lodo I (Cloreto Férrico)	Lodo II (Coagulante Orgânico)	VMP NBR 10.004:2004
2,4,5-T	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	0,002
2,4,5-TP	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	0,03
2,4-D	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	0,03
Aldrin + Dieldrin	mg/L	< 0,00003	< 0,00003	0,00003
Clordano (isômeros)	mg/L	< 0,00003	< 0,00003	0,0002
DDT (isômeros)	mg/L	< 0,00001	< 0,00001	0,002
Endrin	mg/L	< 0,00003	< 0,00003	0,0006
Hexaclorobenzeno	mg/L	< 0,00005	< 0,00005	0,001
Metoxicloro	mg/L	< 0,00003	< 0,00003	0,02
Toxafeno	mg/L	< 0,001	< 0,001	0,005
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	< 0,00002	< 0,00002	0,00003
Lindano (g-BHC)	mg/L	< 0,00003	< 0,00003	0,002
pH Final do Solubilizado		6,7	6,4	

FONTE: A autora (2017).